

EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE UN AUTOMÓVIL A COMBUSTIÓN INTERNA Y UN AUTOMÓVIL ELÉCTRICO EN EL CONTEXTO COLOMBIANO MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

VIVIANA ZULUAGA HIGUITA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Ambiental

**Juan Camilo Ortiz Cuervo
Ingeniero Químico**



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA AMBIENTAL
ENVIGADO
2019**

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su apoyo constante, por creer siempre en mis capacidades y por su amor incondicional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
1. PRELIMINARES.....	12
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Objetivos del proyecto	13
1.2.1 Objetivo General.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 Marco de referencia.....	14
1.3.1 Antecedentes	14
1.3.2 Marco conceptual	15
2. METODOLOGÍA.....	22
2.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO	22
2.1.1 Razones para realizar el estudio	22
2.1.2 Aplicación deseada	22
2.1.3 Público objetivo	23
2.1.4 Limitaciones del estudio	23
2.2 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA.....	23
2.2.1 Características técnicas del vehículo Soul.....	23
2.2.2 Características técnicas del vehículo Soul Eléctrico	24
2.3 ALCANCE DEL ESTUDIO	25
2.3.1 Funciones del sistema estudiado.....	25
2.3.2 Unidad funcional.....	25
2.3.3 Sistemas estudiados	26
2.3.4 Requisitos de calidad de los datos.....	28
2.3.5 La evaluación de impacto	28

2.4	Etapa 2: análisis de inventario del vehículo kia soul	29
2.4.1	Análisis de inventario para la etapa de extracción de materias primas y producción.....	29
2.4.2	Análisis de inventario para la etapa de Transporte	33
2.4.3	Análisis de inventario para la etapa de uso.....	34
2.4.4	Análisis de inventario para la etapa de Mantenimiento	36
2.4.5	Análisis de inventario para la etapa de Disposición final.....	38
2.5	Etapa 2: análisis de inventario del vehículo kia soul eléctrico	39
2.5.1	Análisis de inventario para la etapa de Extracción de materias primas y producción.....	40
2.5.2	Análisis de inventario para la etapa de Transporte	44
2.5.3	Análisis de inventario para la etapa de Uso	46
2.5.4	Análisis de inventario para la etapa de Mantenimiento	47
2.5.5	Análisis de inventario para la etapa de Disposición final.....	48
3.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	50
3.1	Etapa 3 & 4: evaluación de impactos del acv e interpretación	50
3.1.1	Resultados ACV	50
3.1.2	Resultados de la etapa de Extracción de materias primas y producción.....	53
3.1.3	Resultados de la etapa de Transporte	54
3.1.4	Resultados de la etapa de Uso.....	55
3.1.5	Resultados de la etapa de Mantenimiento	56
3.1.6	Resultados de la etapa de Disposición final.....	57
3.1.7	Agotamiento de recursos fósiles.....	59
3.1.8	Cambio climático	60
3.1.9	Formación anual de material particulado	61
3.1.10	Agotamiento anual de metales	62

3.1.11	Toxicidad humana anual.....	63
3.1.12	Transformación natural de la tierra anual.....	64
3.1.13	Consumo anual de agua.....	65
3.1.14	Análisis de sensibilidad.....	66
4.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	67
	REFERENCIAS	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Vehículo Soul / Modelo 2019	24
Tabla 2. Vehículo Soul Eléctrico / Modelo 2019.....	25
Tabla 3. Escenarios vehículo eléctrico.....	28
Tabla 4. Materias primas Vehículo Soul.....	29
Tabla 5. Insumos de producción vehículo Soul.....	30
Tabla 6. Salidas de producción Vehículo Soul	31
Tabla 7. Materia prima anual. Vehículo Soul.....	31
Tabla 8. Insumos de producción anual Vehículo Soul.....	32
Tabla 9. Salidas de producción anual Vehículo Soul	32
Tabla 10. Recorrido Corea del Sur – Medellín	33
Tabla 11. Toneladas-kilómetro para recorrido Corea del Sur - Medellín	33
Tabla 12. Toneladas - kilómetro anuales. Recorrido Corea del Sur – Medellín	34
Tabla 13. Consumo de combustible según el patrón de movilidad.....	34
Tabla 14. Factores de emisión Modelo IVE. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.....	35
Tabla 15. Emisiones a lo largo de la vida útil del vehículo Soul	35
Tabla 16. Factor de emisión de CO ₂	35
Tabla 17. Modelo de emisiones IVE anual. Área Metropolitana del Valle de Aburrá	36
Tabla 18. Calendario de mantenimiento. Vehículo Soul.....	36
Tabla 19. Mantenimiento anual. Vehículo Soul	37
Tabla 20. Consumo energético anual por mantenimiento del VCI.....	38
Tabla 21. Etapa de disposición final. Vehículo Soul.....	38
Tabla 22. Disposición final anual. Vehículo Soul.....	39
Tabla 23. Escenarios planteados para el Vehículo Eléctrico	40

Tabla 24. Materia prima. Vehículo Soul Eléctrico.....	40
Tabla 25. Insumos de producción Vehículo Soul Eléctrico.....	41
Tabla 26. Salidas de producción Vehículo Soul Eléctrico.....	42
Tabla 27. Materia prima anual. Vehículo Soul Eléctrico	43
Tabla 28. Insumos anuales producción. Vehículo Soul Eléctrico	44
Tabla 29. Salidas anuales de producción carrocería. Vehículo Soul Eléctrico	44
Tabla 30. Distancia para recorrido Corea del Sur – Medellín	45
Tabla 31. Toneladas - kilómetro para recorrido Corea del Sur – Medellín.....	45
Tabla 32. Toneladas - kilómetro anuales. Recorrido Corea del Sur – Medellín	45
Tabla 33. Consumo de energía. Vehículo Soul Eléctrico	46
Tabla 34. Consumo energético anual. Vehículo Eléctrico	47
Tabla 35. Calendario de mantenimiento. Vehículo Soul Eléctrico	47
Tabla 36. Mantenimiento anual. Vehículo Soul EV	48
Tabla 37. Consumo energético anual por mantenimiento	48
Tabla 38. Etapa de disposición final. Vehículo Eléctrico	49
Tabla 39. Disposición final anual. Vehículo Eléctrico	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida.....	26
Figura 2. Impacto ambiental comparativo en el Ciclo de Vida.....	50
Figura 3. Puntos de impacto ambiental para el Análisis de Ciclo de Vida.	52
Figura 4. Puntos de impacto ambiental. Etapa extracción de materias primas y producción	53
Figura 5. Puntos de impacto ambiental. Etapa de transporte.....	54
Figura 6. Puntos de impacto ambiental. Etapa de uso.....	55
Figura 7. Puntos de impacto ambiental. Etapa de mantenimiento.....	56
Figura 8. Puntos de impacto ambiental. Etapa de disposición final.....	57
Figura 9. Puntos de impacto ambiental. Etapa de disposición final de la batería eléctrica	58
Figura 10. Valores de impacto. Categoría Agotamiento de recursos fósiles.....	59
Figura 11. Valores de impacto. Categoría Cambio climático.....	60
Figura 12. Valores de impacto. Categoría Formación de material particulado.	61
Figura 13. Valores de impacto. Categoría Agotamiento de metales.....	62
Figura 14. Valores de impacto. Categoría Toxicidad humana.....	63
Figura 15. Valores de impacto. Categoría Transformación natural del suelo.	64
Figura 16. Consumo de agua.....	65

RESUMEN

Actualmente, la movilidad se ha convertido en una de las áreas de mayor impacto ambiental debido a los patrones de tránsito que se han venido desarrollando en las ciudades, especialmente como consecuencia del uso de vehículos que basan su funcionamiento en el uso de combustibles fósiles. Por esta razón, en los últimos años el mundo ha volcado su atención en los vehículos eléctricos como una de las opciones más viables para disminuir los impactos ocasionados por los vehículos convencionales, sin embargo, es importante evaluar la pertinencia de esta transformación. El trabajo presentado a continuación hace énfasis en la importancia de la etapa de diagnóstico, al realizar una evaluación y comparación de los impactos ambientales de dos automóviles livianos, uno de combustión interna y otro eléctrico, dentro del contexto colombiano, mediante un análisis de ciclo de vida (ACV). Para el desarrollo de la metodología se empleó el software OPENLCA y se hizo uso de la base de datos Ecoinvent versión 3.4. Adicionalmente, para la evaluación de los impactos ambientales se empleó la metodología Recipe (H), en la cual se evalúan principalmente 18 categorías de impacto ambiental dentro de las cuales se destacan algunas como: cambio climático, agotamiento de recursos fósiles, agotamiento de metales y toxicidad humana. A partir del análisis de ciclo de vida realizado, se encontró que en el contexto colombiano el vehículo de combustión interna (VCI) es más contaminante que el vehículo eléctrico (VE), ya que este aporta en promedio un 40% más de impactos ambientales durante todo su ciclo de vida (CV). Por otra parte, se encontró que la etapa más contaminante dentro del ciclo de vida del VCI es el uso, con una influencia del 82,6% sobre el impacto ambiental global; mientras que para el vehículo eléctrico se encontró que la etapa más contaminante es la de extracción de materias primas y producción, con una influencia promedio del 80% sobre el impacto global. Adicionalmente, se encontró que el VE tiene un impacto mayor que el VCI en los impactos ambientales de agotamiento de metales, toxicidad humana y transformación natural de la tierra. Los resultados se encuentran directamente relacionados con la fuente de electricidad y el consumo de energía en la fase de uso y son sensibles a la suposición realizada para los modos de conducción del vehículo de combustión interna. Finalmente se resalta la importancia de realizar este tipo de estudios antes de implementar medidas o políticas encaminadas a promover el uso de tecnologías alternativas como los vehículos eléctricos, debido a que según el contexto los resultados pueden variar drásticamente.

Palabras clave: análisis de ciclo de vida, Colombia, impactos ambientales, vehículo de combustión interna, vehículo eléctrico.

ABSTRACT

Transportation has become one of the areas of highest environmental impact due to the transit patterns that have been developing in cities, especially as a result of the use of fossil fuel-based vehicles. It's for this reason that the world has turned its attention toward electrical vehicles in recent years, as one of the most viable options to reduce the impacts generated by conventional vehicles. However, it is important to evaluate the pertinence of this transformation. The project presented herein emphasizes the importance of the diagnostic stage, by evaluating and comparing the environmental impacts of two light vehicles – one powered by internal combustion, and one electric – within the Colombian context through a life cycle analysis (LCA). To carry out this methodology, the software OPENLCA was used, as well as the Ecoinvent database, version 3.4. Additionally, the environmental impact assessment implemented the Recipe (H) methodology, in which 18 main categories of environmental impacts are evaluated, including but not limited to: climate change, fossil resource depletion, metal depletion, and toxicity to humans. From this life cycle analysis, it was concluded that in a Colombian context, the internal combustion vehicle (ICV) was more polluting than the electric vehicle (EV), as it generates an average of 40% more environmental impacts during the span of its life cycle (LC). Also, it was determined that the most polluting stage within the ICV's life cycle is the use stage, with an influence of 82,6% of the overall environmental impact; meanwhile, the most polluting stage for the EV was found to be the extraction of raw material and production, with an average influence of 80% of the overall environmental impact. Additionally, it was concluded that the EV has a higher impact than the ICV when it comes to metal depletion, toxicity to humans, and natural soil transformation. These results are in direct relation to the power source and energy consumption in the use stage, and they're sensitive to the assumption made for the driving patterns of the internal combustion vehicle. Finally, this work stresses the importance of doing these sorts of studies before implementing measures or policies aimed at promoting the use of alternative technologies such as electric vehicles, as the results can vary drastically according to their context.

Key words: Colombia, electric vehicle, environmental impacts, internal combustion vehicle, life cycle analysis.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el mundo se encuentra atravesando una crisis ambiental notoria que cada vez se manifiesta con mayor intensidad. Los impactos ambientales ocasionados por las actividades antropogénicas son cada vez más alarmantes, y por lo tanto se hace indispensable tomar medidas determinantes que logren compensar y mitigar todos los daños que el ser humano ha ocasionado al medio ambiente hasta el día de hoy.

Una de las áreas donde se ha visto reflejada esta problemática ambiental es la movilidad en las ciudades, debido a los patrones que se han desarrollado en estas zonas, especialmente como consecuencia del uso de vehículos que basan su funcionamiento en la quema de combustibles fósiles. Por esta razón en los últimos años el mundo ha puesto su atención en los vehículos eléctricos como una de las opciones más viables para disminuir los impactos ambientales ocasionados por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas por los vehículos de combustión interna.

En el trabajo presentado a continuación se realiza una evaluación y comparación de los impactos ambientales de un automóvil liviano a combustión interna y un automóvil liviano eléctrico, dentro del contexto colombiano, a partir de un análisis de ciclo de vida (ACV). Inicialmente se lleva a cabo una contextualización general de ambos vehículos, realizando el análisis de dos automóviles fabricados por la empresa surcoreana KIA; posteriormente se realiza un análisis de inventario del ciclo de vida de ambos vehículos a partir de la base de datos Ecoinvent, teniendo en cuenta las siguientes etapas: materias primas y producción, transporte, uso, mantenimiento y disposición final. Finalmente, se obtienen los impactos ambientales a través del software OpenLCA y se emplea la metodología Recipe, la cual define para el análisis 18 categorías de impacto ambiental.

Con el fin de enmarcar el ACV en el contexto colombiano se tienen en cuenta diferentes variables que influyen en las etapas del CV de los vehículos analizados. Concretamente se tuvieron las siguientes consideraciones: transporte de ambos vehículos desde Corea del Sur hasta el interior del país; patrón de generación energética en Colombia para el año 2017; emisiones generadas por un vehículo de combustión interna en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá; factor de emisión de CO₂ para la gasolina comercializada en Colombia; consumo de la energía colombiana en las etapas de uso, mantenimiento y disposición final; y procesos de reciclaje implementados en Colombia en la etapa de disposición final.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La sociedad actual se caracteriza por depender en gran medida del transporte por carretera, con un nivel de dependencia tal que las tendencias de desarrollo proyectan para el año 2050 un crecimiento sustancial en este tipo de transporte (Hawkins, Singh, Majeau-Bettez, & Strømman, 2013). Según un estudio de movilidad realizado por el Consejo Empresarial Mundial para el desarrollo sostenible, en el año 2000 existían cerca de 700 millones de vehículos ligeros en todo el mundo, para el año 2030 se proyecta que este número aumente a 1.300 millones y para el año 2050 se proyecta una cantidad de aproximadamente 2.000 millones de vehículos (WBCSD, 2004). Según estas cifras es posible pensar que en pocos años este aumento acelerado podría ocasionar graves impactos ambientales.

Uno de los impactos ambientales más significativo ocasionado por los vehículos de combustión interna es el cambio climático, el cual se ha convertido en una problemática bastante alarmante a nivel mundial; este fenómeno es causado principalmente por la creciente concentración de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente de CO₂, como consecuencia de la quema de combustibles fósiles como petróleo, gas y carbón (Andrade, Castañeda, Arteaga & Segura, 2017). Los vehículos de combustión interna (VCI) constituyen una parte importante de esta problemática: se estima que aproximadamente el 13% de las emisiones globales de GEI son generadas por el sector transporte, y particularmente en Colombia se estima que anualmente este sector aporta aproximadamente el 10% de los GEI del país (IPCC, 2006; IDEAM & PNUD, 2016).

Ante esta problemática, el sector automovilístico ha trabajado cada vez con mayor fuerza en el desarrollo de nuevas tecnologías como los vehículos eléctricos (VE), que logren disminuir el impacto ambiental en comparación con los vehículos de combustión interna que han funcionado durante años (Mateo, 2010). Si bien el panorama actual sugiere el reemplazo de los vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos como un cambio positivo, es necesario analizar los impactos ambientales negativos que puede acarrear la producción y el funcionamiento de los VE, especialmente por las etapas de extracción de materias primas, producción y disposición final de las baterías durante su ciclo de vida (Hall & Lutsey, 2018).

Algunos de los procesos de fabricación de las baterías requieren altas temperaturas que solo pueden ser alcanzadas mediante energía producida a partir de combustibles fósiles, lo cual hace que los vehículos eléctricos tengan impactos ambientales graves desde su fabricación al emitir gases de efecto invernadero (Hall & Lutsey, 2018). Lo anterior, hace que la fabricación de estos vehículos sea cuestionable teniendo en cuenta que uno de los impactos que se pretende mitigar con los vehículos eléctricos es la emisión de este tipo de gases.

Por otra parte, estas baterías representan un reto para el sector automovilístico, ya que para su fabricación se requiere de grandes cantidades de metales como litio, hierro y cadmio. Todas estas sustancias implican directamente una explotación minera que podría traer consigo el agotamiento de estos recursos naturales como consecuencia del consumo excesivo de materias primas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Además, es importante considerar que las baterías destinadas a la locomoción de vehículos presentan un tiempo de vida útil corto, lo cual hace que su disposición final sea problemática en caso de que se generen en grandes cantidades, teniendo en cuenta además que se trata de un residuo peligroso que requiere de un manejo especial debido a sus componentes, y que podría traer consigo impactos de contaminación del suelo y el agua.

Por lo anterior, resulta necesario realizar un análisis de ciclo de vida tanto para los vehículos eléctricos livianos como para los vehículos de combustión interna, para el contexto colombiano, con el fin de determinar si los impactos ambientales de los VE son significativamente menores o no en comparación con los vehículos de combustión interna.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Evaluar los impactos ambientales de los vehículos eléctricos livianos en el contexto colombiano en comparación con los de combustión interna, mediante un análisis de ciclo de vida.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir las condiciones y los parámetros iniciales para llevar a cabo el análisis de ciclo de vida.
- Desarrollar el análisis de ciclo de vida de un vehículo eléctrico liviano y un vehículo de combustión interna para el contexto colombiano.
- Comparar los resultados del análisis de ciclo de vida del vehículo eléctrico y el vehículo de combustión interna.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1 Antecedentes

El proceso de transformación de vehículos de combustión interna hacia otras tecnologías más limpias como los vehículos eléctricos ha tomado mucha fuerza en el mundo. Según la Agencia Internacional de Energía (2014), “Aunque el aumento en las ventas de VE es extremadamente ambicioso, una revisión de los objetivos anunciados recientemente por los gobiernos de todo el mundo sugiere que, al combinarlos, estos suman un aumento aún más ambicioso hasta 2020, particularmente para Europa”. La creciente incorporación al mercado de estas tecnologías ha llevado a que los países y las organizaciones a nivel mundial cuestionen su viabilidad, no solo económica sino también ambiental. En este contexto, el estudio del impacto ambiental de los VE ha surgido como un tema de gran interés, que a su vez ha generado bastante controversia alrededor de los diferentes resultados obtenidos en los estudios.

Recientemente la Federación Europea de Transporte y Medio Ambiente publicó un artículo en el que se abordan dos temáticas esenciales en términos ambientales: el impacto climático de los vehículos eléctricos, y el uso y la disponibilidad de metales críticos empleados en la fabricación de las baterías de estos vehículos. Según este estudio los VE emiten menor cantidad de gases de efecto invernadero que los vehículos convencionales, incluso cuando estos funcionan con electricidad producida con el mayor consumo de carbono de Europa. Adicionalmente el estudio afirma que la disponibilidad de los “metales críticos y los minerales de tierras raras” no será un factor limitante en las próximas décadas para la transición a esta tecnología (Transport & Environment, 2017). Sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio representan solo una de las posiciones asumidas actualmente frente al impacto ambiental de los EV.

Dentro de esta serie de estudios se destaca también una investigación desarrollada por un grupo de científicos de la Universidad de Noruega de Ciencias y Tecnología, en la cual se lleva a cabo una evaluación comparativa del ciclo de vida ambiental de vehículos convencionales y eléctricos, enfocando la atención no solo en la etapa de uso, sino también en las etapas de producción y disposición final de estos vehículos. De acuerdo con los resultados obtenidos los científicos afirman que es posible reducir las emisiones de GEI si se hace uso de VE junto con fuentes de electricidad bajas en carbono. Sin embargo, los resultados indican que estos vehículos tienen el potencial de generar aumentos significativos en la toxicidad humana, la eco-toxicidad del agua dulce y la eutrofización del agua dulce; además de tener impactos sobre el agotamiento de los metales empleados. (Hawkins, Singh, Majeau – Bettez & Strømman, 2012).

Los estudios actuales se han desarrollado con mucha fuerza en Europa, sin embargo, Estados Unidos también ha participado de esta investigación. Particularmente en California se desarrolló un estudio para la Junta de Recursos del Aire, en el cual se calculan las emisiones de energía y los equivalentes de CO₂ de un vehículo de gasolina convencional, un vehículo híbrido y un vehículo eléctrico, para determinar los costos ambientales del ciclo de vida de cada uno de ellos en este estado. Según los resultados obtenidos se afirma que los vehículos eléctricos son más eficientes en energía y menos contaminantes que los vehículos convencionales, además de que la contaminación atmosférica que producen se da principalmente en la generación de energía, siendo esta una fuente puntual mucho más

fácil de mitigar en comparación con los vehículos convencionales que resultan ser fuentes móviles de contaminación (Aguirre et al., 2012).

1.3.2 Marco conceptual

○ **Análisis de ciclo de vida (ACV)**

Es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un proceso/producto durante su ciclo de vida completo (Leiva, 2016).

Según la norma internacional UNE-EN ISO 14040 *Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia*, el Análisis de Ciclo de Vida se define como una técnica que trata los aspectos medioambientales y los impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto, mediante:

- La recopilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema del producto (producto/proceso en estudio).
- La evaluación de los impactos medioambientales potenciales asociados con las entradas y salidas identificadas en el inventario.
- La interpretación de los resultados de las fases de análisis de inventario y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio.

Existen tres tipos de análisis de ciclo de vida (Leiva, 2016):

- **ACV conceptual:** es un estudio de carácter cualitativo en el que se hace uso de datos generales, cuya finalidad es la identificación de los impactos ambientales potenciales más significativos.
- **ACV simplificado:** presenta un nivel de complejidad medio, se lleva a cabo un análisis selectivo de los impactos ambientales tomando en cuenta información general y abarcando el ciclo de vida forma superficial, seguido de una simplificación en la que se centra la atención en las etapas más importantes, y un análisis de fiabilidad de los resultados.
- **ACV completo:** es el análisis de mayor complejidad, se realiza un análisis detallado de los impactos ambientales incluyendo métodos cualitativos y cuantitativos. Este es el análisis de ciclo de vida que se llevó a cabo para la elaboración del presente estudio.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El Análisis de Ciclo de Vida consta de cuatro etapas, definidas en la norma ISO 14040, las etapas se exponen a continuación:

Etapas 1. Definición del Objetivo y Alcance del ACV. En los objetivos se exponen los motivos por los que se desarrolla el estudio, la aplicación prevista y a quién va dirigido. El alcance consiste en la definición de la amplitud, profundidad y detalle del estudio.

Etapas 2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida. Esta fase incluye la identificación y cuantificación de las entradas (consumo de recursos) y salidas (emisiones al aire, suelo y aguas y generación de residuos) del sistema del producto. Por sistema del producto se entiende el conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente que realizan una o más funciones idénticas.

Etapas 3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida. Durante esta etapa, utilizando los resultados del análisis de inventario, se evalúa la importancia de los potenciales impactos ambientales generados por las entradas y salidas del sistema del producto.

Etapas 4. Interpretación, la cual incluye la combinación de los resultados de las dos etapas anteriores, con la finalidad de extraer, de acuerdo con los objetivos y alcance del estudio, conclusiones y recomendaciones que permitan la toma de decisiones.

○ **Software OpenLCA**

OpenLCA es un software de código abierto gratuito desarrollado para la Evaluación de sostenibilidad y la Evaluación del ciclo de vida. Dentro de sus características más relevantes se destaca las siguientes (OpenLCA, 2019):

- Identifica los principales conductores a lo largo del ciclo de vida, por proceso, flujo o por categoría de impacto.
- Proporciona información muy detallada sobre los resultados de cálculo y análisis.
- Se encuentra disponible públicamente bajo la Licencia Pública de Mozilla, MPL 2.0.
- Se encuentra dentro de la misma categoría de los softwares SimaPro, GaBi o Umberto.

El software fue desarrollado por la empresa alemana GreenDelta desde el año 2007. GreenDelta es una empresa de software y consultoría de sostenibilidad independiente ubicada en Berlín, Alemania; fundada en 2004. Esta empresa ofrece servicios líderes a nivel internacional que cubren todos los aspectos de software y consultoría en sostenibilidad.

○ **Base de datos Ecoinvent**

Ecoinvent es una base de datos internacional especializada en Inventarios de Ciclo de Vida (ICV), actualmente proporciona alrededor de 14.700 conjuntos de datos de ICV para diferentes sectores de la economía como: suministro de energía, agricultura, transporte,

biocombustibles y biomateriales, productos químicos, materiales de construcción, madera y tratamiento de residuos sólidos, entre otros.

Dentro de los inventarios de ciclo de vida disponibles en la base de datos se encuentra la cuantificación de los consumos de materias primas, así como los insumos requeridos para la fabricación de los productos y las salidas como residuos sólidos, emisiones y vertimientos, derivadas de todos los procesos que están dentro de los límites del sistema.

La base de datos ha sido desarrollada en Suiza desde el año 2003 y sus desarrolladores se consolidan como una Asociación sin ánimo de lucro en la cual participan diferentes institutos como el Instituto de Ciencias de la Sostenibilidad Agroscope, el Instituto Paul Scherrer, y el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zurich.

El desarrollo de Ecoinvent ha sido patrocinado por El Centro Suizo para los Inventarios de Ciclo de Vida, el cual tiene la misión de promover las buenas prácticas de análisis de inventario de ciclo de vida mediante el suministro de datos de ICV para respaldar la evaluación del impacto ambiental y socioeconómico de las decisiones (Ecoinvent, 2019).

○ **ReCiPe**

ReCiPe es un método empleado para la evaluación de impacto en un análisis de ciclo de vida. Fue desarrollado en el año 2008 por el Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de los países bajos (RIVM), por la empresa Pre Consultants, el Instituto de Ciencias Ambientales (CML) y por la Universidad Radboud, en nombre del Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente de Holanda (RIVM, 2019).

La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) empleada por Recipe traduce las emisiones y las extracciones de recursos en un número limitado de puntajes de impacto ambiental mediante factores de caracterización. Existen dos formas principales de emplear factores de caracterización, a nivel medio y a nivel final. ReCiPe calcula: 18 indicadores de punto medio y 3 indicadores de punto final (Pre Consultants, 2019).

Los indicadores de punto medio se centran en problemas ambientales únicos como el cambio climático o la acidificación del suelo y arrojan como resultado valores con unidades de medida físicas; mientras que los indicadores de punto final muestran el resultado en puntos de impacto ambiental en tres niveles de agregación más altos, siendo estos: el efecto en la salud humana, la biodiversidad y la escasez de recursos.

Cada método (punto medio, punto final) contiene factores de acuerdo con tres perspectivas culturales establecidas. Estas perspectivas representan un conjunto de opciones sobre temas como el tiempo o las expectativas de que se dé una gestión adecuada o de que el desarrollo de la tecnología venidera pueda evitar daños futuros, e indican el periodo de tiempo en el que los impactos ocasionados desaparecerán por completo de La Tierra. Las perspectivas mencionadas son (Pre Consultants, 2019):

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **Individualista (I):** en una perspectiva a corto plazo (20 años), optimismo de que la tecnología puede evitar muchos problemas en el futuro.
- **Jerárquica (H):** es una perspectiva de consenso (100 años), considerada a menudo como el modelo predeterminado.
- **Igualitaria (E):** es una perspectiva de largo plazo (varía según el impacto entre 1000, 100.000 e infinito), basada en el principio de precaución del pensamiento.

Finalmente, los 18 indicadores de punto medio establecidos por la metodología ReCiPe son:

- Acidificación del suelo
- Agotamiento de la capa de ozono
- Agotamiento de metales
- Agotamiento de recursos fósiles
- Cambio climático – ecosistemas
- Cambio climático – salud humana
- Ecotoxicidad del agua dulce
- Ecotoxicidad marina
- Ecotoxicidad del suelo
- Eutroficación de agua dulce
- Formación de material particulado
- Formación de oxidantes fotoquímicos
- Ocupación del suelo urbano
- Ocupación de las tierras agrícolas
- Radiación ionizante
- Toxicidad humana
- Transformación natural de la tierra
- Uso del agua

○ **Características técnicas generales de los vehículos de combustión interna**

La caracterización de los vehículos en términos de su motor se lleva a cabo en función de la energía base empleada para su funcionamiento, distinguiendo principalmente tres tipos de motores: de combustión interna, eléctrico, e híbrido o combinado. De allí que los vehículos sean clasificados como vehículos de combustión interna, eléctricos o híbridos.

El principio de funcionamiento de los motores automotrices de combustión interna consiste en transformar la energía térmica generada por la quema del combustible, ya sea diésel, gasolina, o gas natural; en energía mecánica manifestada en el movimiento del vehículo. Adicionalmente, dependiendo del motor los ciclos de funcionamiento de este serán diferentes, es decir, en caso de que el combustible sea gasolina o gas natural se lleva a cabo un ciclo Otto y en caso de emplear diésel se lleva cabo un ciclo Diésel (UTC, s.f.)¹.

Teniendo en cuenta que el vehículo de combustión interna analizado en el presente trabajo emplea gasolina como combustible, a continuación, se describe con mayor detalle el funcionamiento de este motor (Auto Scout24, 2018).

Principio de funcionamiento del motor a gasolina: en la actualidad el motor más empleado para los vehículos livianos es el motor Otto de cuatro tiempos; este motor se caracteriza por realizar la transformación de energía calorífica a energía mecánica mediante cuatro fases: admisión, compresión, explosión y escape. Durante este ciclo un pistón se desplaza en el interior de un cilindro llevando a cabo cuatro desplazamientos y, gracias a un sistema manivela-biela, se logra transformar el movimiento lineal del pistón en un movimiento de rotación del cigüeñal, el cual a su vez realiza dos vueltas completas en cada ciclo de funcionamiento (Porrás & Soriano, s.f.).

El motor Otto de cuatro tiempos está compuesto principalmente por una válvula, un pistón, un cilindro, una biela, una bujía y un cigüeñal. Su ciclo se describe a continuación (Martínez, 2007):

Admisión: en esta etapa el pistón se encuentra ubicado en el punto más alto del cilindro, la válvula de admisión se abre y el pistón debido al vacío que se crea al interior del cilindro aspira la mezcla de aire y combustible hasta llegar finalmente al punto más bajo del cilindro.

Compresión: posteriormente, la válvula de admisión se cierra y el pistón asciende comprimiendo la mezcla aire – combustible hasta alcanzar nuevamente el punto más alto del cilindro.

Explosión: cuando se ha comprimido la mezcla, se produce una chispa eléctrica por medio de la bujía, con la cual el combustible es encendido, aumentando así la presión en el cilindro y haciendo descender el pistón nuevamente hacia el punto más bajo del cilindro. En esta etapa se realiza el trabajo útil.

Escape: finalmente, se abre la válvula de escape y el pistón asciende empujando los gases quemados producto de la combustión. En el momento en que el pistón llega al punto más alto del cilindro la válvula de escape se cierra.

○ Características técnicas generales de los vehículos eléctricos

Los motores eléctricos a diferencia de los vehículos de combustión hacen uso de electricidad generada mediante una batería, para convertirla en energía mecánica a través de los campos magnéticos que se producen por la acción de dos imanes, uno móvil denominado rotor, y uno fijo denominado estator, y por un circuito eléctrico ubicado entre ambos imanes que a su vez genera su propio campo electromagnético. Se distinguen ampliamente dos tipos de motores eléctricos: motores de corriente directa y motores de corriente alterna (Auto Scout24, 2018).

Los motores que funcionan con corriente alterna pueden ser clasificados de varias formas: por su velocidad de giro, por el tipo de rotor y por el número de fases de alimentación. Teniendo en cuenta esta clasificación a continuación se entrará en detalle en la información

que corresponde específicamente al funcionamiento del motor eléctrico del KIA Soul Electric (Bueno, s.f.).

Principio de funcionamiento de un motor de corriente alterna síncrono

Este tipo de motores reciben la denominación de síncrono debido a que la velocidad del campo magnético del estator es igual a la velocidad de giro del rotor, además de que la velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta. Por otra parte, cuando se habla de imanes permanentes, se hace referencia a que el rotor consta de electroimanes que giran sincrónicamente con el campo del estator.

En cualquier motor de corriente alterna síncrono se pueden distinguir las siguientes partes (Fondo Formación, 2001; Universidad de Valencia, 2008):

Estator: es un conjunto de chapas magnéticas en las que se aloja el devanado fijo.

Rotor: este es el elemento giratorio del motor, se encuentra constituido por chapas magnéticas y un devanado donde se induce la corriente.

Bobinados o devanados: es un conjunto de conductores de la máquina eléctrica. Pueden clasificarse en bobinado inductor y bobinado inducido. El bobinado inductor es el devanado por donde circula la corriente eléctrica que da la creación a un electroimán con su correspondiente campo magnético; y el bobinado inducido es un circuito eléctrico donde se induce el movimiento como consecuencia de la interacción entre campos magnéticos.

Un motor síncrono necesita una conexión a corriente alterna que suministre energía a las bobinas de inducido, y una fuente de corriente continua denominada excitatriz, que alimente las bobinas del inductor. Adicionalmente, es necesaria la presencia de un sistema colector que introduzca la corriente en el rotor.

○ **Proceso hidrometalúrgico**

El proceso hidrometalúrgico es una técnica de reciclaje de metales, empleada actualmente para la recuperación del litio existente en las baterías eléctricas que finalizan su vida útil. Este proceso consta fundamentalmente de cuatro etapas (Murillo, 2016):

1) Criogenización: debido a la naturaleza reactiva del litio las baterías son sumergidas en un baño de nitrógeno líquido que se encuentra a $-198\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al finalizar este proceso la reactividad disminuye drásticamente y las baterías pueden ser sometidas de forma segura a un proceso mecánico de triturado.

2) Proceso mecánico: las baterías son sometidas a un proceso de trituración mediante un molino de martillos; con este proceso se busca reducir su tamaño hasta lograr que los fragmentos tengan una medida homogénea de una pulgada aproximadamente.

3) Reacción: los fragmentos obtenidos en la segunda etapa son introducidos en un tanque de reacción en el que se adiciona agua e hidróxido de litio (LiOH). En el tanque se forman varias sales después de la reacción, las cuales empiezan a precipitarse a medida que la

concentración de LiOH aumenta. Dentro de estas sales se encuentran: cloruro de litio (LiCl) y carbonato de litio (LiCO₃).

4) Separación de sales: las sales que se precipitan son bombeadas periódicamente a un tanque de sedimentación, posteriormente se hacen pasar por un filtro prensa y se obtiene un concentrado de sales. El concentrado obtenido es situado en un electrolito con ácido sulfúrico. Finalmente, las sales son separadas en Li⁺ y en diversos aniones y se hace pasar por una membrana en la que los aniones son repelidos, formándose LiOH en el lado básico.

2. METODOLOGÍA

El Análisis de Ciclo de Vida desarrollado en el presente trabajo fue elaborado siguiendo los lineamientos establecidos por la norma internacional UNE-EN ISO 14040 *Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia*. Para su elaboración se implementó el software OpenLCA y la base de datos Ecoinvent versión 3.4. Adicionalmente, la evaluación del impacto del ciclo de vida descrita anteriormente en la etapa número tres, fue desarrollada mediante la metodología Recipe Jerárquica (H), la cual establece para el análisis 18 categorías de impacto ambiental.

A continuación, se expone el desarrollo de las cuatro etapas del análisis de ciclo de vida: *Definición del Objetivo y Alcance del ACV, Análisis de Inventario de Ciclo de Vida, Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida e Interpretación*.

2.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

2.1.1 Razones para realizar el estudio

El presente análisis de ciclo de vida se realiza con el propósito de ser un instrumento de diagnóstico con el que se busca ampliar la información para Colombia, relacionada con los impactos ambientales de los vehículos de combustión interna y de los vehículos eléctricos y su respectiva comparación, con el fin de ser un soporte teórico para la toma de decisiones y la implementación de medidas relacionadas con la movilidad sostenible en el país.

2.1.2 Aplicación deseada

Al buscar alternativas para reemplazar los vehículos de combustión interna, es indispensable llevar a cabo estudios que aseguren que estas son realmente viables ambientalmente, garantizando así el progreso y la validez del cambio tecnológico en coherencia con el medio ambiente. Los vehículos eléctricos se consolidan como la opción más viable para reemplazar los vehículos de combustión interna, por lo que es de vital importancia conocer a profundidad cuáles son sus impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida, con el fin de aplicar de manera oportuna las medidas necesarias para la mitigación e idealmente la desaparición de estos impactos.

Adicionalmente se resalta la importancia de comparar el ACV de los vehículos eléctricos frente al ACV de los vehículos de combustión interna, ya que este tipo de acciones contribuyen al fortalecimiento de las tecnologías emergentes que buscan mitigar los impactos ambientales de las tecnologías convencionales, además de apoyar el fortalecimiento y el desarrollo de nuevas políticas en materia ambiental y apoyar la investigación sólida para facilitar la toma de decisiones (Hawkins, Singh, Majeau-Bettez, & Strømman, 2013).

Por otra parte, en coherencia con el primer objetivo específico, se define que el siguiente análisis se llevará a cabo tomando como referentes de estudio los vehículos Soul y Soul eléctrico, fabricados por la empresa surcoreana KIA.

Finalmente, teniendo en cuenta que el vehículo eléctrico presenta condiciones mecánicas altamente fluctuantes, y que la tecnología apenas está incursionando en Colombia, se decide realizar el Análisis de ciclo de vida de este vehículo bajo cuatro escenarios de cambio con variaciones en su vida útil y en la disposición final de la batería eléctrica.

2.1.3 Público objetivo

El siguiente análisis de ciclo de vida se desarrolla como trabajo de grado para la Universidad EIA, para optar por el título de ingeniería ambiental.

El objetivo del análisis de ciclo de vida por lo tanto es:

Evaluar los impactos ambientales más significativos en el ciclo de vida de un vehículo liviano de combustión interna, y de un vehículo eléctrico liviano, analizando para este último vehículo cuatro escenarios de cambio con variaciones en su vida útil y en la disposición final de la batería eléctrica; y comparar los resultados para obtener un perfil de impactos ambientales.

2.1.4 Limitaciones del estudio

La metodología ACV seleccionada permite una comparación general de fuentes de impactos en todo el ciclo de vida. Sin embargo, el enfoque presenta las siguientes limitaciones al momento de la interpretación de los resultados:

- I. Se asume que la vida útil del vehículo de combustión interna es de 16 años.
- II. Se asume que el desplazamiento del vehículo de combustión interna se realiza el 70% del tiempo en zona urbana y el 30% del tiempo en zona rural.

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

Para la elaboración del análisis de ciclo de vida tanto de los vehículos de combustión interna como de los vehículos eléctricos se seleccionaron dos prototipos con un diseño muy similar, estos son el KIA Soul y el KIA Soul Eléctrico, ambos modelos 2019; los cuales difieren principalmente en su sistema de locomoción. Estos vehículos son fabricados por la empresa automotriz surcoreana KIA, la cual importa y comercializa ambos vehículos en el país.

2.2.1 Características técnicas del vehículo Soul

El KIA Soul es un vehículo descrito por la empresa KIA como un vehículo con estilo SUV por sus siglas en inglés, es decir, un vehículo deportivo utilitario. En términos técnicos se resaltan a continuación algunas características de utilidad para la realización del análisis de ciclo de vida correspondiente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 1. *Vehículo Soul / Modelo 2019*

Motor	
Tipo	1,6 L DOHC 16 Válvulas CVVT DUAL
Cilindraje (cm ³)	1.591
Número de cilindros	4 cilindros en línea
Potencia máxima (hp/rpm)	122 / 6.300
Torque máximo (Nm/rpm)	152 / 4.850
Tipo de combustible	Gasolina
Sistema de inyección	Inyección Multipunto
Capacidad Tanque Combustible (L)	54
Ruedas	
Rin	16" de lujo
Llantas	205/ 60 R16
Dimensiones	
Peso del vehículo (Ton)	1,212
Largo (mm)	4.140
Ancho (mm)	1.800
Alto (mm)	1.600
Distancia entre ejes (mm)	2.570

Adaptado de: (KIA, 2019)

Adicionalmente el automóvil cuenta con otros equipamientos de normal funcionamiento como espejos laterales con ajuste eléctrico, limpia vidrios trasero intermitente, exploradoras, faros halógenos con reflector multi foco, faros delanteros, entre otros.

2.2.2 Características técnicas del vehículo Soul Eléctrico

Al igual que para el KIA Soul, a continuación, se presenta información técnica de interés empleada para llevar a cabo el análisis de ciclo de vida del vehículo eléctrico elegido.

El KIA Soul es un vehículo descrito por la empresa KIA, al igual que el vehículo de combustión interna, como una camioneta con estilo SUV. Se caracteriza por ser un vehículo 100% eléctrico, cuenta con una autonomía de 200 km por cada carga y tiene capacidad para 5 pasajeros. En términos técnicos se resaltan a continuación algunas características de utilidad para la realización del análisis de ciclo de vida correspondiente.

Tabla 2. Vehículo Soul Eléctrico / Modelo 2019

KIA SOUL ELÉCTRICO / MODELO 2019	
Motor	
Tipo	Eléctrico (motores de imanes Permanentes Sincronos AC)
Voltaje (V)	360
Potencia máxima de salida (kW/hp/rpm)	81,4/ 109 / 2.730 – 8.000
Torque máximo (Nm/rpm)	285/ 2.730
Capacidad batería (KWh)	27
Potencia batería kW	90
Capacidad (Ah)	75
Recarga rápida (33 minutos)	50 kW – (80%)
Recarga estándar (menos de 5 horas)	66 kW (100%)
Velocidad máxima (km/h)	145
Distancia de conducción por recarga aprox. (km)	200
Ruedas	
Rin	16" Aluminio
Llantas	205/60 R16
Dimensiones	
Peso del vehículo (Ton)	1,490
Largo (mm)	4.140
Ancho (mm)	1.800
Alto (mm)	1.600
Distancia entre ejes (mm)	2.750

Adaptado de: (KIA, 2019)

2.3 ALCANCE DEL ESTUDIO

2.3.1 Funciones del sistema estudiado

Los vehículos livianos tanto eléctricos como de combustión interna tienen como función la movilización o el transporte de personas.

2.3.2 Unidad funcional

La unidad funcional es una medida del comportamiento de las salidas funcionales de un sistema y su propósito es proporcionar una referencia para las entradas y salidas de este. Esta referencia es necesaria para asegurar que la comparación de los sistemas se hace sobre una base común. Por lo tanto, según la función del sistema estudiado y sus características, la unidad funcional que se ha elegido es la siguiente:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Transportar un pasajero durante un año, teniendo en cuenta que durante este tiempo se recorren 15.000 kilómetros de distancia (Ecoinvent, 2017).

2.3.3 Sistemas estudiados

En la siguiente Figura se representan esquemáticamente las etapas principales consideradas en el sistema estudiado en el Análisis de Ciclo de Vida.



Figura 1. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida. Elaboración propia

Límites de los sistemas

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV, y qué cargas ambientales se estudiarán y a qué nivel de detalle.

○ Límites geográficos

Los límites geográficos se definen teniendo en cuenta los lugares de fabricación y comercialización de los vehículos seleccionados. Por este motivo se define como límites geográficos a los países Corea del Sur y Colombia.

Corea del Sur

Se determina a este país como un límite geográfico debido a que la etapa de fabricación dentro del ciclo de vida de los vehículos seleccionados es llevada a cabo en este territorio por la empresa KIA.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Empresa automotriz KIA

KIA Motors Corporation fue fundada en 1944 en Corea, siendo la corporación fabricante de vehículos más antigua de este país. Actualmente su sede central se encuentra ubicada en Seúl, ciudad capital de Corea del Sur.

Esta empresa produce más de 1,4 millones de vehículos al año en 14 plantas de fabricación y montaje distribuidas en ocho países como Estados Unidos, Eslovaquia, Rusia, China, México y Corea del Sur. A su vez estos vehículos son vendidos a través de 3.000 distribuidores y concesionarios de 172 países.

En Corea del Sur, Kia cuenta con tres grandes plantas de montaje de vehículos: Hwasung, Sohari y Kwangju; un centro de investigación y desarrollo de escala mundial y un centro de investigación y desarrollo especializado en medio ambiente. Además, la empresa cuenta con otros centros de investigación en Estados Unidos, Japón y Alemania (KIA, 2019).

En Colombia son comercializados los vehículos fabricados directamente en Corea del Sur, estos son ingresados al país por el Valle del Cauca, llegando específicamente al puerto de Buenaventura sobre la Costa Pacífica. Posteriormente estos vehículos se comercializan a través de diferentes concesionarios que se encuentran distribuidos sobre gran parte del territorio colombiano (La República, 2015).

Colombia

Teniendo en cuenta el enfoque del presente trabajo respecto al contexto colombiano, el análisis de ciclo de vida se verá limitado geográficamente a las dinámicas al interior del país, específicamente en las etapas posteriores a la entrada de los vehículos al territorio colombiano, y en este contexto se evaluarán igualmente los impactos correspondientes a estas etapas. Es importante resaltar que se evaluará el proceso de llevar los vehículos desde el puerto de Buenaventura hasta el centro del país.

○ Límites temporales

Vehículo KIA Soul

El horizonte temporal utilizado para este vehículo es su vida útil aproximada, que en promedio es de 16 Años.

Vehículo KIA Soul Electric

Debido a la alta fluctuación mecánica de los vehículos eléctricos se definieron cuatro escenarios con los cuales se busca abarcar un panorama amplio que permita evaluar los impactos ambientales en función de la variabilidad de la vida útil y la cantidad de baterías usadas, así como su proceso de reciclaje o disposición final. A continuación, se muestran los escenarios evaluados.

Tabla 3. *Escenarios vehículo eléctrico*

VARIACIONES	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4
Vida útil del vehículo	10 años	16 años	20 años	16 años
Vida útil de la batería	10 años	16 años	10 años	16 años
Número de baterías usadas	Una	Una	Dos	Una
La batería es reciclada	No	No	Si	Si

Fuente: elaboración propia

○ Etapas excluidas del análisis

Para este estudio las cargas ambientales relativas a la producción de maquinaria para transporte, maquinaria para la producción o para la extracción de materias primas e infraestructura no se tienen en cuenta por no ser sujetas a cambios por decisión de este proyecto.

2.3.4 Requisitos de calidad de los datos

Los requisitos de calidad de los datos recogidos han sido los siguientes:

- **Ámbito temporal de los datos:** para este estudio se considera aceptable, datos de máximo 10 años de antigüedad.
- **Ámbito geográfico de los datos:** los datos recolectados pueden ser locales y promedios sectoriales internacionales.
- **Ámbito tecnológico:** los datos recolectados provienen de la tecnología usualmente utilizada para cada sector.

2.3.5 La evaluación de impacto

Para hacer la evaluación de impactos ambientales se empleó la metodología Recipe. Esta metodología utiliza el procedimiento de caracterización por el cual se calcula la contribución relativa de una sustancia a una categoría de impacto determinada.

Como se mencionó anteriormente, la metodología mencionada realiza un análisis de 18 categorías de impacto que se encuentran agrupadas en tres categorías principales: Ecosistemas, Salud humana y recursos. De las 18 categorías analizadas por esta metodología, se eligieron las 7 categorías de mayor impacto tanto para el vehículo de combustión interna como para el vehículo eléctrico, estas fueron: cambio climático-ecosistemas, cambio climático salud humana, formación de material particulado, agotamiento de recursos fósiles, agotamiento de metales, toxicidad humana, y transformación natural de la tierra.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Adicionalmente, es importante destacar que, para efectos del análisis realizado, el ciclo de vida fue evaluado considerando la perspectiva jerárquica, es decir, se evalúan los impactos considerando que estos tendrán una permanencia de 100 años en La Tierra.

2.4 ETAPA 2: ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL VEHÍCULO KIA SOUL

A continuación, se expone de forma detallada la información correspondiente a cada una de las etapas analizadas para el ciclo de vida del vehículo de combustión interna.

2.4.1 Análisis de inventario para la etapa de extracción de materias primas y producción

○ Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso

Durante el desarrollo del inventario de materias primas y producción se identificó que la información correspondiente al proceso de extracción de materias primas y al proceso de producción del vehículo KIA Soul no se encuentra disponible para su revisión. Debido a esta limitación fue necesario extraer la información correspondiente a estos procesos de la base de datos Ecoinvent.

Los datos suministrados por Ecoinvent corresponden a valores globales que caracterizan un vehículo liviano genérico, por esta razón toda la información extraída de la base de datos fue escalada haciendo uso del peso vacío del vehículo analizado, de este modo se logró disminuir el margen de diferencia entre los valores proporcionados por la base de datos y los valores reales.

Los datos que se exponen a continuación corresponden a las materias primas requeridas para la fabricación del vehículo KIA Soul de combustión interna y a los insumos y salidas correspondientes a su proceso de producción después de ser escalados. Los valores negativos observados en las cantidades de algunas materias primas hacen referencia a elementos utilizados en la fabricación del vehículo que han sido reutilizados o reciclados para ser incorporados posteriormente a otro proceso.

Tabla 4. *Materias primas Vehículo Soul*

ENTRADAS	PESO (kg)
Aceite lubricante	10,280
Acero	1682,2
Ácido sulfúrico	1,1464
Aluminio	205,33
Caucho sintético	54,104
Chatarra de aluminio	-39,982
Chatarra de hierro	-299,21

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ENTRADAS	PESO (kg)
Cloruro de polivinilo, suspensión polimerizada	11,131
Cobre	12,178
Copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno	5,009
Diodo emisor de luz	0,120
Etilenglicol	8,025
Fibra de viscosa	19,74
Magnesio	0,763
Moldeo por inyección	15,133
Nylon 6	3,339
Paladio	0,0003
Plástico reforzado con fibra de vidrio y resina de poliéster	0,478
Platino	0,0018
Plomo	17,574
Polietileno de baja densidad granulado	16,70
Polietileno, alta densidad, granulado	17,656
Polipropileno granulado	56,768
Poliuretano, espuma flexible	31,340
Polvo de recubrimiento (pintura)	13,155
Residuos plásticos	-9,1102
Resina epóxica líquida	13,155
Sulfuro de polifenileno	31,528
Tereftalato de polietileno, granulado, amorfo	1,670
Vidrio	71,77
Zinc	1,526

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

Tabla 5. *Insumos de producción vehículo Soul*

TIPO DE INSUMO	CANTIDAD	UNIDAD
Agua del grifo	3687,3	kg
Calor (distinto del gas natural)	72,1	MJ
Calor (gas natural)	2542,0	MJ
Electricidad, media tensión	2450,8	kWh

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

Tabla 6. *Salidas de producción Vehículo Soul*

TIPO DE SALIDA	CANTIDAD	UNIDAD
Agua (emisión agua)	146,6	m3
Agua (emisión aire)	409,6	kg
Carbono orgánico disuelto (COD) (emisión al agua)	0,08	kg
Carbono orgánico total (COT) (emisión al agua)	0,08	kg
Carrocería	896,7	kg
Compuestos orgánicos volátiles (emisión al aire)	5,50	kg
Demanda biológica de oxígeno (DBO5) (emisión al agua)	0,03	kg
Demanda química de oxígeno (DQO) (emisión al agua)	0,22	kg
Fosfato (emisión al agua)	0,001	kg

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

○ **Vinculación de los datos con la unidad funcional**

A continuación, se exponen las cantidades en términos de la unidad funcional, tanto de la materia prima, como de los insumos y las salidas; considerando que la vida útil del vehículo de combustión interna es de 16 años. Todos los valores fueron divididos por la vida útil con el fin de obtener las cantidades que generarían impacto únicamente durante un periodo de tiempo de un año.

Tabla 7. *Materia prima anual. Vehículo Soul*

ENTRADAS	PESO/ AÑO (kg)
Aceite lubricante	0,642
Acero	105,135
Ácido sulfúrico	0,072
Aluminio	12,883
Caucho sintético	3,382
Chatarra de aluminio	-2,499
Chatarra de hierro	-18,700
Cloruro de polivinilo, suspensión polimerizada	0,696
Cobre	0,761
Copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno	0,313
Diodo emisor de luz	0,007
Etilenglicol	0,502
Fibra de viscosa	1,234
Magnesio	0,048
Moldeo por inyección	0,946
Nylon 6	0,209
Plástico reforzado con fibra de vidrio y resina de poliéster	0,030
Platino	0,00011

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Plomo	1,098
Polietileno de baja densidad granulado	1,044
Polietileno, alta densidad, granulado	1,103
Polipropileno granulado	3,548
Poliuretano, espuma flexible	1,959
Polvo de recubrimiento (pintura)	0,822
Residuos plásticos	-0,569
Resina epóxica líquida	0,822
Sulfuro de polifenileno	1,970
Tereftalato de polietileno, granulado, amorfo	0,104
Vidrio	4,486
Zinc	0,095

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

Tabla 8. *Insumos de producción anual Vehículo Soul*

TIPO DE INSUMO	CANTIDAD	UNIDAD
Agua del grifo	230,45	kg
Calor (distinto del gas natural)	4,509	MJ
Calor (gas natural)	158,87	MJ
Electricidad, media tensión	153,17	kWh

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

Tabla 9. *Salidas de producción anual Vehículo Soul*

SALIDAS ANUALES		
Agua (emisión agua)	9,16	m3
Agua (emisión aire)	25,60	kg
Carbono orgánico disuelto (COD) (emisión al agua)	0,01	kg
Carbono orgánico total (COT) (emisión al agua)	0,01	kg
Carrocería	56,05	kg
Compuestos orgánicos volátiles (emisión al aire)	0,34	kg
Demanda biológica de oxígeno (DBO5) (emisión al agua)	0,002	kg
Demanda química de oxígeno (DQO) (emisión al agua)	0,01	kg
Fosfato (emisión al agua)	0,00007	kg

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

2.4.2 Análisis de inventario para la etapa de Transporte

○ Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso

Como se mencionó anteriormente, el vehículo analizado es producido en su totalidad en Corea del Sur y posteriormente es transportado en buques transoceánicos, especializados en transporte de vehículos, hasta Colombia. Al llegar a Colombia estos autos son descargados en el departamento del Valle del Cauca en el puerto de Buenaventura y finalmente son distribuidos a todo el país mediante camiones de carga.

Para realizar el análisis en el marco del contexto colombiano, se evaluó el recorrido marítimo desde Corea del Sur hasta Colombia, y el transporte terrestre hasta el interior del país, llevando el vehículo hasta la ciudad de Medellín. A continuación, se muestra el desarrollo del inventario de transporte señalado.

Posteriormente los recorridos son llevados a Tonelada – Kilómetro, en esta etapa se tiene en cuenta el peso del vehículo, con el fin de obtener las toneladas por kilómetro que se movilizan únicamente del vehículo analizado, es decir, se dejan de tener en cuenta los demás vehículos que son transportados ya sea por el buque o por el camión de carga.

Tabla 10. *Recorrido Corea del Sur – Medellín*

RECORRIDO	DISTANCIA	UNIDAD
Recorrido Marítimo – Corea del Sur – Valle del Cauca	16.295	Km
Recorrido Terrestre – Valle del Cauca - Medellín	466	Km

Adaptado de: (Google Maps,2019; Sea Rates, 2019)

Tabla 11. *Toneladas-kilómetro para recorrido Corea del Sur - Medellín*

RECORRIDO	TON - KM
Marítimo: Corea del Sur – Valle del Cauca	19.749,5
Terrestre: Valle del Cauca - Medellín	564,8

○ Vinculación de los datos con la unidad funcional

Finalmente se lleva a cabo la vinculación del inventario de transporte con la unidad funcional dividiendo las Toneladas – Kilómetro de cada uno de los recorridos por la vida útil del vehículo analizado, siendo esta equivalente a 16 años.

Tabla 12. Toneladas - kilómetro anuales. Recorrido Corea del Sur – Medellín

RECORRIDO	TON – KM / AÑO
Marítimo: Corea del Sur – Valle del Cauca	1.234,3
Terrestre: Valle del Cauca - Medellín	35,3

2.4.3 Análisis de inventario para la etapa de uso

○ Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso

Consumo de combustible

Para llevar a cabo el inventario de uso del vehículo de combustión interna se obtiene el consumo de combustible a lo largo de su vida útil. Adicionalmente, para términos del Análisis de Ciclo de Vida se hace la suposición de que el consumo de combustible anual es de tipo mixto, es decir, el vehículo recorre el 70% del tiempo zonas urbanas y el 30% del tiempo recorre zonas rurales, y se tiene en cuenta el rendimiento del vehículo de acuerdo a este patrón de movilidad. A continuación, se muestra la cantidad de combustible consumido por el vehículo durante 16 años de funcionamiento.

Tabla 13. Consumo de combustible según el patrón de movilidad

RECORRIDO	RENDIMIENTO (km/ galón)
Ciudad	41,84
Carretera	49,89
Mixto	44,26

Adaptado de: (Fuel Economy, 2018)

$$\text{Combustible consumido} = (0,023 \text{ gal} / \text{km}) * 240.000 \text{ km}$$

$$\text{Combustible consumido} = 5.520 \text{ galones}$$

Emisiones

De forma complementaria al consumo de combustible se calculan las emisiones de varios contaminantes teniendo en cuenta el funcionamiento del vehículo en la ciudad de Medellín. Estos cálculos se realizan haciendo uso de un Modelo Internacional de Emisiones de Vehículos (IVE), elaborado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad Pontificia Bolivariana. A continuación, se muestran los factores de emisión extraídos del modelo y las emisiones correspondientes a 16 años de funcionamiento del vehículo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 14. Factores de emisión según *Modelo IVE. Área Metropolitana del Valle de Aburrá*

UBICACIÓN	FACTORES DE EMISIÓN (g/km)						
	VOC	CO	NO _x	PM	NH ₃	N ₂ O	CH ₄
Medellín	0,065	1,120	0,264	0,003	0,064	0,005	0,013

Adaptado de: (AMVA & UPB, 2016)

Tabla 15. *Emisiones a lo largo de la vida útil del vehículo Soul*

UBICACIÓN	EMISIONES (kg)						
	VOC	CO	NO _x	PM	NH ₃	N ₂ O	CH ₄
Medellín	15,6	268,8	63,36	0,72	15,36	1,2	3,12

Adicionalmente se realiza el cálculo de las emisiones de CO₂ a lo largo de la vida útil del vehículo para el contexto colombiano, haciendo uso del factor de emisión publicado por la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME), correspondiente a la categoría de combustible denominada *Gasolina E10 Comercial*.

Tabla 16. *Factor de emisión de CO₂*

FACTOR DE EMISIÓN DE CO ₂	
Gasolina E10 Comercial	7,6181 kg CO ₂ / galón

Adaptado de: (UPME, 2019)

Emisiones de CO₂ = 5.520 gal * 7,6181 kg CO₂ /gal

Emisiones de CO₂ = 42.052 kg CO₂

○ Vinculación de los datos con la unidad funcional

Consumo de combustible

Con el fin de vincular la cantidad total de combustible consumido a la unidad funcional establecida en el análisis, este valor se divide por la vida útil para obtener la cantidad de combustible consumido por el vehículo anualmente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Combustible consumido anualmente = 5.520 gal /16 años

Combustible consumido anualmente = 345 galones/ año

Emisiones

Para realizar el vínculo entre las emisiones de contaminantes y la unidad funcional se multiplican todas las cantidades del modelo IVE dadas en g/km por 15000 km recorridos por el vehículo en un año de funcionamiento. A continuación, se muestran los gramos por año emitidos de cada contaminante.

Tabla 17. *Modelo de emisiones IVE anual. Área Metropolitana del Valle de Aburrá*

UBICACIÓN	EMISIÓN (kg / año)						
	VOC	CO	NO _x	PM	NH ₃	N ₂ O	CH ₄
Medellín	0,975	16,8	3,96	0,045	0,96	0,075	0,195

Finalmente se realiza el cálculo de las emisiones de CO₂ para un año de funcionamiento del vehículo de combustión.

Emisiones anuales de CO₂ = 42052 kg CO₂/ 16 años

Emisiones anuales de CO₂ = 2628,3 kg CO₂/ año

2.4.4 Análisis de inventario para la etapa de Mantenimiento

○ Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso

Para realizar este inventario se tomó la información del calendario de mantenimiento disponible en el Manual del Propietario del vehículo KIA Soul. De este calendario se seleccionaron los elementos más representativos dentro del proceso de mantenimiento anual, estos elementos se sintetizan a continuación.

Tabla 18. *Calendario de mantenimiento. Vehículo Soul*

ELEMENTO	DISTANCIA RECORRIDA
Aceite del motor	Cambio cada 10.000 km
Llantas y neumáticos	Cambio cada 30.000 km

Adaptado de: (AMVA & UPB, 2016)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Adicionalmente se tuvieron en cuenta otros elementos de mantenimiento disponibles en la base de datos Ecoinvent, estos fueron: etilenglicol, cobre, etileno, Tereftalato de polietileno, polietileno, polipropileno, ácido sulfúrico y plomo, que resultan como producto del cambio de refrigerante y del cambio de la batería durante la vida útil del vehículo.

Vinculación de los datos con la unidad funcional

La vinculación de los datos de mantenimiento se hizo considerando las cantidades estándar de cambio de un vehículo de combustión interna para las llantas y para el aceite lubricante. A partir de estas cantidades se calculó la cantidad de cambio anual teniendo en cuenta los kilómetros mínimos de mantenimiento.

A continuación, se exponen todos los elementos que son cambiados durante el mantenimiento del vehículo tras un año de funcionamiento.

Tabla 19. *Mantenimiento anual. Vehículo Soul*

ELEMENTO	CANTIDAD (kg)
Aceite lubricante de motor	5,29
Ácido sulfúrico	0,14
Cobre	0,03
Etilenglicol	0,2
Etileno	3,8
Llantas y neumáticos	6,8
Plomo	2,5
Polipropileno	0,6
Polietileno	0,5
Tereftalato de polietileno	0,5

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017; KIA, 2019)

Adicionalmente, dentro de este inventario se tiene en cuenta la energía requerida anualmente para llevar a cabo el proceso de mantenimiento. Este dato se extrae de la base de datos y es adaptado al suministro de energía colombiano, es decir, considerando un abastecimiento de energía proveniente en un 85,8% de hidroeléctricas, en un 13,9 % de termoeléctricas, en un 0,01% de energías alternativas como energía solar y eólica, y en un 0,26% es importada desde Ecuador (XM, 2017).

Tabla 20. Consumo energético anual por mantenimiento del VCI

CONSUMO ENERGÉTICO	CANTIDAD
Electricidad de bajo voltaje	58,3 kWh

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

2.4.5 Análisis de inventario para la etapa de Disposición final

○ Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso

Para realizar el inventario de disposición final se llevó a cabo la descomposición del vehículo en dos piezas, la carrocería y el motor de combustión interna. Esta división se realizó debido a que la base de datos Ecoinvent cuenta con información sobre el proceso de aprovechamiento y disposición de estas partes de forma individual. Además, fueron considerados como parte de la disposición final los residuos de las llantas y del aceite lubricante del motor, provenientes del mantenimiento del vehículo.

Tabla 21. Etapa de disposición final. Vehículo Soul

ELEMENTO A DISPONER O RECUPERAR	CANTIDAD (kg)
Aceite lubricante del motor	84,64
Carrocería	896,7
Llantas y neumáticos	108,8
Motor de combustión interna	315,3

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017; KIA, 2019)

Los procesos de tratamiento, recuperación y disposición final de la carrocería y del Motor de combustión interna fueron adecuados en la base de datos dentro de los tratamientos existentes, conservando las magnitudes y los procesos de recuperación o reciclaje desarrollados en Colombia, y modificando el suministro de energía, de modo que este se de en las condiciones de producción energética colombiana.

- **Vinculación de los datos con la unidad funcional**

A continuación, se exponen las cantidades correspondientes a la disposición final anual.

Tabla 22. *Disposición final anual. Vehículo Soul*

ELEMENTO A DISPONER O RECUPERAR	CANTIDAD (kg)
Aceite lubricante del motor	5,29
Carrocería	56,04
Llantas y neumáticos	6,80
Motor de combustión interna	19,70

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017; KIA, 2019)

2.5 ETAPA 2: ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL VEHÍCULO KIA SOUL ELÉCTRICO

Debido a que el vehículo eléctrico presenta condiciones mecánicas altamente fluctuantes, y que la tecnología apenas se encuentra incursionando en Colombia se decidió realizar el Análisis de Ciclo de Vida de este vehículo bajo cuatro escenarios que se encuentran relacionados principalmente con la batería eléctrica, ya que esta pieza es la responsable de que el vehículo aún se encuentre en un proceso de constante mejora en busca de mayor eficiencia.

Estos escenarios parten de la suposición de que el escenario 1 presenta las condiciones más desfavorables para el ambiente, y en orden ascendente el escenario 4 presenta las condiciones ambientales más favorables.

Escenario 1: vehículo con 10 años de vida útil, este tiempo de uso depende directamente de la vida útil de la batería eléctrica que es igualmente de 10 años. Cuando la batería llega a su término es enviada directamente al relleno sanitario.

Escenario 2: vehículo con 16 años de vida útil, este tiempo de uso depende directamente de la vida útil de la batería eléctrica que es igualmente de 16 años. Cuando la batería llega a su término es enviada directamente al relleno sanitario. Este escenario permite realizar una comparación directa con el vehículo de combustión interna en términos de tiempo de uso.

Escenario 3: vehículo con 20 años de vida útil, durante su tiempo de uso se emplean dos baterías cada una con 10 años de vida útil, cuando la primera batería llega a su término ésta es reemplazada por una nueva para ser usada los últimos 10 años. Ambas baterías se reciclan al término de su vida útil.

Escenario 4: vehículo con 16 años de vida útil, este tiempo de uso depende directamente de la vida útil de la batería eléctrica que es igualmente de 16 años. Cuando la batería llega a su término ésta es reciclada.

Tabla 23. *Escenarios planteados para el Vehículo Eléctrico*

VARIACIONES	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4
Vida útil del vehículo	10 años	16 años	20 años	16 años
Vida útil de la batería	10 años	16 años	10 años	16 años
Número de baterías usadas	Una	Una	Dos	Una
La batería es reciclada	No	No	Si	Si

2.5.1 Análisis de inventario para la etapa de Extracción de materias primas y producción

○ Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso

Como se mencionó para el vehículo de combustión, durante el desarrollo del inventario de materias primas y producción se identificó que la información correspondiente a estos procesos no se encuentra disponible para el vehículo KIA Soul Eléctrico. Debido a esta limitación fue necesario extraer la información correspondiente a estos procesos de la base de datos Ecoinvent.

Los datos suministrados por Ecoinvent corresponden a valores globales que caracterizan un vehículo eléctrico liviano genérico, por esta razón toda la información extraída de la base de datos fue escalada haciendo uso del peso vacío del vehículo analizado, de este modo se logró disminuir el margen de diferencia entre los valores proporcionados por la base de datos y los valores reales.

Los datos que se exponen a continuación corresponden a las materias primas requeridas para la fabricación del vehículo KIA Soul Eléctrico y a los insumos y salidas correspondientes a su proceso de producción después de ser escalados. Los valores negativos observados en las cantidades de algunas materias primas hacen referencia a elementos utilizados en la fabricación del vehículo que han sido reutilizados o reciclados para ser incorporados posteriormente a otro proceso.

Tabla 24. *Materia prima. Vehículo Soul Eléctrico*

ENTRADAS	PESO (kg)
Aceite lubricante	3,70
Acero	1754,7
Aluminio	86,04
Ánodo, grafito	159,54
Carbonato de etileno	63,47

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ENTRADAS	PESO (kg)
Cátodo, LiMn_2O_4 , para batería de iones de litio	130
Caucho sintético	55,15
chatarra de aluminio, nueva	-1,07
chatarra de hierro, sin clasificar	-309,41
Cloruro de polivinilo, suspensión polimerizada	12,12
Cobre & trefilado de cobre	49,23
Condensador, tipo película	1,67
Copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno	5,45
Diodo emisor de luz	0,13
Extrusión, película plástica	29,15
Extrusión, tubos plásticos	6,08
Ferrito	1,93
Fibra de vidrio	0,23
Fibra de viscosa	21,48
Hexafluorofosfato de litio	7,57
Imán permanente para motor eléctrico	2,42
Latón	1,19
Magnesio	0,83
Nitrógeno líquido	3,98
Nylon 6	3,94
Plástico reforzado con fibra de vidrio, resina de poliéster	0,52
Plomo	2,91
Poliestireno	0,52
Polietileno, alta densidad, granulado.	6,08
Polietileno, baja densidad, granulado	47,36
Polipropileno granulado	61,79
Poliuretano, espuma flexible	34,11
polvo de recubrimiento (pintura)	14,32
Producto de silicona	0,013
Residuos plásticos, electrónica industrial	-5,15
resina epóxica líquida	14,32
Resina poliéster insaturada	0,77
Resistencia, auxiliares y uso de energía	0,42
resistencia, montaje en superficie	0,04
Separador de batería	21,34
tablero de cableado impreso, montado en superficie, sin Pb	1,98
Templado, vidrio plano	39,06
Tereftalato de polietileno, granulado, amorfo	1,82
vidrio plano, sin recubrimiento	39,06
Zinc	1,66

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 25. *Insumos de producción Vehículo Soul Eléctrico*

TIPO DE INSUMO	CANTIDAD	UNIDAD
Agua de grifo	2.966,33	kg
Calor central o de pequeña escala, distinto de gas natural	837,07	MJ
Calor, distrito o industrial, distinto del gas natural	58,04	MJ
Calor, distrito o industrial, gas natural	2.098,12	MJ
Electricidad, baja tensión	0,31	kWh
Electricidad de media tensión	2.046,05	kWh

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

Tabla 26. *Salidas de producción Vehículo Soul Eléctrico*

TIPO DE SALIDA	CANTIDAD	UNIDAD
Agua (emisión agua)	2,52	m3
Agua (emisión aire)	444,95	kg
Carbono orgánico disuelto (emisión al agua)	0,07	kg
Carbono orgánico total (emisión al agua)	0,07	kg
Compuestos orgánicos volátiles (emisión al aire)	4,42	kg
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	0,02	kg
Demanda química de oxígeno (DQO)	0,18	kg
Fosfato (emisión al agua)	0,001	kg

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

○ **Vinculación de los datos con la unidad funcional**

A continuación, se exponen las cantidades en términos de la unidad funcional, tanto de la materia prima, como de los insumos y las salidas. Para la conversión se tienen en cuenta los diferentes escenarios descritos inicialmente, en los cuales varía la vida útil del vehículo, y la cantidad de baterías usadas y su disposición final. Todos los valores fueron divididos por la vida útil respectiva con el fin de obtener las cantidades que generarían impacto únicamente durante un periodo de tiempo de un año, en este sentido, para los escenarios 2 y 4 se presentan los mismos valores ya que la vida útil en ambos casos es de 16 años.

Tabla 27. *Materia prima anual. Vehículo Soul Eléctrico*

ENTRADAS ANUALES	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2 & 4	ESCENARIO 3
	CANTIDAD (kg)		
Aceite lubricante	0,37	0,23	0,18
Acero	175,47	109,67	87,73
Aluminio	8,60	5,38	4,96
Ánodo, grafito	15,95	9,97	15,95
Carbonato de etileno	6,35	3,97	6,35
Cátodo, LiMn ₂ O ₄ , para batería de iones de litio	13,001	8,13	13,00
Caucho sintético	5,51	3,45	2,76
chatarra de aluminio, nueva	-0,11	-0,07	-0,05
chatarra de hierro, sin clasificar	-30,94	-19,34	-15,47
Cloruro de polivinilo, suspensión polimerizada	1,21	0,76	0,61
Cobre & trefilado de cobre	4,92	3,08	2,99
Condensador, tipo película	0,17	0,10	0,08
Copolímero de acrilonitrilo-butadieno-estireno	0,55	0,34	0,27
Diodo emisor de luz	0,01	0,01	0,01
Extrusión, película plástica	2,92	1,82	2,92
Extrusión, tubos plásticos	0,61	0,38	0,61
Ferrito	0,19	0,12	0,10
Fibra de vidrio	0,02	0,014	0,02
Fibra de viscosa	2,15	1,34	1,07
Hexafluorofosfato de litio	0,76	0,47	0,76
Imán permanente para motor eléctrico	0,24	0,15	0,12
Latón	0,12	0,07	0,06
Magnesio	0,08	0,05	0,04
Nitrógeno líquido	0,40	0,25	0,40
Nylon 6	0,39	0,25	0,20
Plástico, resina de poliéster	0,05	0,03	0,03
Plomo	0,29	0,18	0,15
Poliestireno	0,05	0,03	0,03
Poliétileno, alta densidad, granulado.	0,61	0,38	0,61
Poliétileno, baja densidad, granulado	4,74	2,96	3,83
Polipropileno granulado	6,18	3,86	3,09
Poliuretano, espuma flexible	3,41	2,13	1,71
polvo de recubrimiento (pintura)	1,43	0,89	0,72
Producto de silicona	0,001	0,001	0,001
Residuos plásticos, electrónica industrial	-0,51	-0,32	-0,26
resina epóxica líquida	1,43	0,89	0,72
Resina poliéster insaturada	0,08	0,05	0,04
Resistencia, auxiliares y uso de energía	0,04	0,03	0,02
resistencia, montaje en superficie	0,004	0,002	0,002
Separador de batería	2,13	1,33	2,13
tablero de cableado impreso, sin Pb	0,20	0,12	0,10
Templado, vidrio plano	3,91	2,44	1,95
Tereftalato de polietileno, granulado, amorfo	0,18	0,11	0,09
vidrio plano, sin recubrimiento	3,91	2,44	1,95
Zinc	0,17	0,10	0,08

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 28. *Insumos anuales producción. Vehículo Soul Eléctrico*

INSUMO	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2 & 4	ESCENARIO 3	UNIDAD
Agua de grifo	296,63	296,63	148,32	kg
Calor central de pequeña escala, gas natural	83,71	83,71	41,85	MJ
Calor, distrito o industrial, sin gas natural	5,80	5,80	2,90	MJ
Calor, distrito o industrial, gas natural	209,81	209,81	106,20	MJ
Electricidad, baja tensión	0,03	0,03	0,02	kWh
Electricidad, media tensión	204,61	204,61	104,40	kWh

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

Tabla 29. *Salidas anuales de producción carrocería. Vehículo Soul Eléctrico*

TIPO DE INSUMO	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2 & 4	ESCENARIO 3	UNIDAD
Agua (emisión agua)	0,25	0,158	0,13	m3
Agua (emisión aire)	44,49	27,809	22,25	kg
Carbono orgánico disuelto (emisión al agua)	0,01	0,004	0,003	kg
Carbono orgánico total (emisión al agua)	0,01	0,004	0,003	kg
Compuestos orgánicos volátiles	0,44	0,276	0,221	kg
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	0,002	0,001	0,001	kg
Demanda química de oxígeno (DQO)	0,02	0,011	0,009	kg
Fosfato (emisión al agua)	0,00009	0,0001	0,00005	kg

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

2.5.2 Análisis de inventario para la etapa de Transporte

○ Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso

Al igual que el vehículo de combustión interna, el vehículo eléctrico analizado es producido en su totalidad en Corea del Sur y posteriormente es transportado en buques transoceánicos, especializados en transporte de vehículos, hasta Colombia. Al llegar a Colombia estos autos son descargados en el departamento del Valle del Cauca en el puerto de Buenaventura y finalmente son distribuidos a todo el país mediante camiones de carga.

Para realizar el análisis en el marco del Contexto Colombiano, se evaluó el recorrido marítimo desde Corea del Sur hasta Colombia, y el transporte terrestre hasta el interior del país, llevando el vehículo hasta la ciudad de Medellín. A continuación, se muestra el desarrollo del inventario de transporte señalado.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 30. *Distancia para recorrido Corea del Sur – Medellín*

RECORRIDO	KILÓMETROS
Recorrido Marítimo – Corea del Sur – Valle del Cauca	16.295 kilómetros
Recorrido Terrestre – Valle del Cauca - Medellín	466 kilómetros

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

Posteriormente los recorridos son llevados a Tonelada – Kilómetro, en esta etapa se tiene en cuenta el peso del vehículo, con el fin de obtener las toneladas por kilómetro que se movilizan únicamente del vehículo analizado, es decir, se dejan de tener en cuenta los demás vehículos que son transportados ya sea por el buque o por el camión de carga.

Tabla 31. *Toneladas - kilómetro para recorrido Corea del Sur – Medellín*

RECORRIDO	TON - KM
Marítimo: Corea del Sur – Valle del Cauca	24.279,6
Terrestre: Valle del Cauca - Medellín	694,3

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

○ Vinculación de los datos con la unidad funcional

Finalmente se lleva a cabo la vinculación del inventario de transporte con la unidad funcional dividiendo las Toneladas – Kilómetro de cada uno de los recorridos por la vida útil del vehículo analizado, según los cuatro escenarios planteados.

Tabla 32. *Toneladas - kilómetro anuales. Recorrido Corea del Sur – Medellín*

RECORRIDO	TON – KM / AÑO		
	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2 & 4	ESCENARIO 3
Marítimo: Corea del Sur – Valle del Cauca	2427,9	1517,5	1213,1
Terrestre: Valle del Cauca - Medellín	69,4	43,4	34,7

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

2.5.3 Análisis de inventario para la etapa de Uso

○ Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso

Para el desarrollo de este inventario en el contexto colombiano se tuvo en cuenta el modelo de generación de energía del Sistema Interconectado Nacional de Colombia (SIN), en el cual se registra que actualmente la generación energética en Colombia proviene en un 85,8% de hidroeléctricas, en un 13 % de termoeléctricas, en un 0,9% de energías alternativas como energía solar y eólica y en un 0,3% es importada desde Ecuador (XM, 2017).

Esta generación correspondiente a Colombia fue creada dentro del software OpenLCA dentro de tres procesos: electricidad alto voltaje, electricidad medio voltaje y transformación alta – media tensión. Estos procesos existían previamente en la base y lo que se hizo fue adecuarlos de acuerdo a las condiciones colombianas, para esto los porcentajes según el tipo de generación nacional fueron ingresados al proceso electricidad alto voltaje, el cual fue empleado como insumo para los otros dos procesos.

En cuanto a los impactos ambientales ocasionados por la generación energética se tiene en cuenta el promedio de emisiones de CO₂ en el año 2017. Para obtener este valor se hace uso del reporte energético de XM para este año, en el cual se especifica el tipo de combustible que usa cada una de las centrales termoeléctricas, la cantidad usada y la energía generada en este periodo. Posteriormente con estos datos se hace el cálculo de las emisiones de CO₂ mediante la calculadora de emisiones de la UPME, donde se encuentran inmersos los factores de emisión de los combustibles colombianos.

A continuación, se muestra el consumo de energía correspondiente a los vehículos eléctricos según las mediciones de la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (EPA).

Tabla 33. *Rendimiento vehículo Soul Eléctrico*

CONSUMO ENERGÉTICO	
19,3	kWh/100 km

Adaptado de: (EPA, 2019)

- **Vinculación de los datos con la unidad funcional**

Para llevar a cabo la vinculación de la etapa de uso del vehículo eléctrico con la unidad funcional se calcula el consumo energético anual, es decir el consumo del vehículo para 15.000 kilómetros de recorrido.

Tabla 34. *Consumo energético anual. Vehículo Eléctrico*

CONSUMO ENERGÉTICO	UNIDAD
2895	kWh/año

Adaptado de: (Fuel Economy, 2019)

2.5.4 Análisis de inventario para la etapa de Mantenimiento

- **Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso**

Para realizar este inventario se tomó la información del calendario de mantenimiento disponible en el Manual del Propietario del vehículo KIA Soul eléctrico. De este calendario se seleccionaron los elementos más representativos dentro del proceso de mantenimiento anual, estos elementos se sintetizan a continuación.

Tabla 35. *Calendario de mantenimiento. Vehículo Soul Eléctrico*

ELEMENTO	DISTANCIA RECORRIDA
Llantas y neumáticos	Cambio cada 30.000 km

Adaptado de: (KIA, 2019)

Adicionalmente se tuvieron en cuenta otros elementos de mantenimiento disponibles en la base de datos Ecoinvent, estos fueron: etilenglicol, cobre, etileno, polietileno, polipropileno. Los cuales provienen del mantenimiento asociado al cambio de refrigerante y al mantenimiento del motor eléctrico del VE.

- **Vinculación de los datos con la unidad funcional**

A continuación, se exponen todos los elementos que son cambiados durante el mantenimiento del vehículo tras un año de funcionamiento.

Tabla 36. *Mantenimiento anual. Vehículo Soul EV*

ELEMENTO	CANTIDAD (kg)
Cobre	0,03
Etilenglicol	0,2
Etileno	3,8
Llantas y neumáticos	6,8
Polipropileno	0,6
Polietileno	0,5

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017; KIA, 2019)

Adicionalmente, dentro de este inventario se tiene en cuenta la energía requerida anualmente para llevar a cabo el proceso de mantenimiento. Este dato se extrae de la base de datos Ecoinvent y es adaptado al suministro de energía colombiano descrito anteriormente.

Tabla 37. *Consumo energético anual por mantenimiento*

CONSUMO ENERGÉTICO	CANTIDAD
Electricidad de bajo voltaje	58,3 kWh

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

2.5.5 Análisis de inventario para la etapa de Disposición final

- **Descripción cualitativa y cuantitativa del proceso**

Para realizar el inventario de disposición final se llevó a cabo la descomposición del vehículo eléctrico en tres piezas, la carrocería y la batería y el tren motor. Esta división se realizó debido a que la base de datos Ecoinvent cuenta con información sobre el proceso de aprovechamiento y disposición de estas partes de forma individual. Además, fueron considerados como parte de la disposición final los residuos de las llantas provenientes del mantenimiento del vehículo.

Tabla 38. *Etapas de disposición final. Vehículo Eléctrico*

ELEMENTO A DISPONER O RECUPERAR	CANTIDAD (kg)
Batería	274,5
Carrocería	1.109,3
Tren Motor	106,2
Llantas y neumáticos	108,8

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

Los procesos de tratamiento, recuperación y disposición final de la carrocería, la batería y el tren motor fueron adecuados en la base de datos dentro de los tratamientos existentes, conservando las magnitudes y los procesos de recuperación o reciclaje desarrollados en Colombia, y modificando el suministro de energía, de modo que este se dé en las condiciones de producción energética colombiana. A continuación, se exponen las cantidades correspondientes a la disposición final anual.

Tabla 39. *Disposición final anual. Vehículo Eléctrico*

ELEMENTO A DISPONER O RECUPERAR	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4
	CANTIDAD (kg)			
Batería	27,45	17,16	27,45	17,16
Carrocería	110,93	69,33	55,5	69,33
Tren motor	10,62	6,64	5,3	6,64
Llantas y neumáticos	10,88	6,80	5,4	6,80

Adaptado de: (Ecoinvent, 2017)

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 ETAPA 3 & 4: EVALUACIÓN DE IMPACTOS DEL ACV E INTERPRETACIÓN

A continuación, se presentan los resultados del estudio, donde se identifica cuál etapa es más impactante para el ambiente, las categorías de impacto más representativas, y cómo es el aporte de impactos de cada etapa, así como el análisis de sensibilidad de las estimaciones realizadas.

3.1.1 Resultados ACV

Resultados metodología Recipe Endpoint (H, A)

De acuerdo con los resultados obtenidos para el contexto colombiano, es posible afirmar que el vehículo de combustión interna es más contaminante que el vehículo eléctrico. Al llevar a cabo la comparación entre los vehículos analizados, se evidencia que los impactos ambientales del VCI siempre están por encima de los impactos del VE al menos en un 40%.

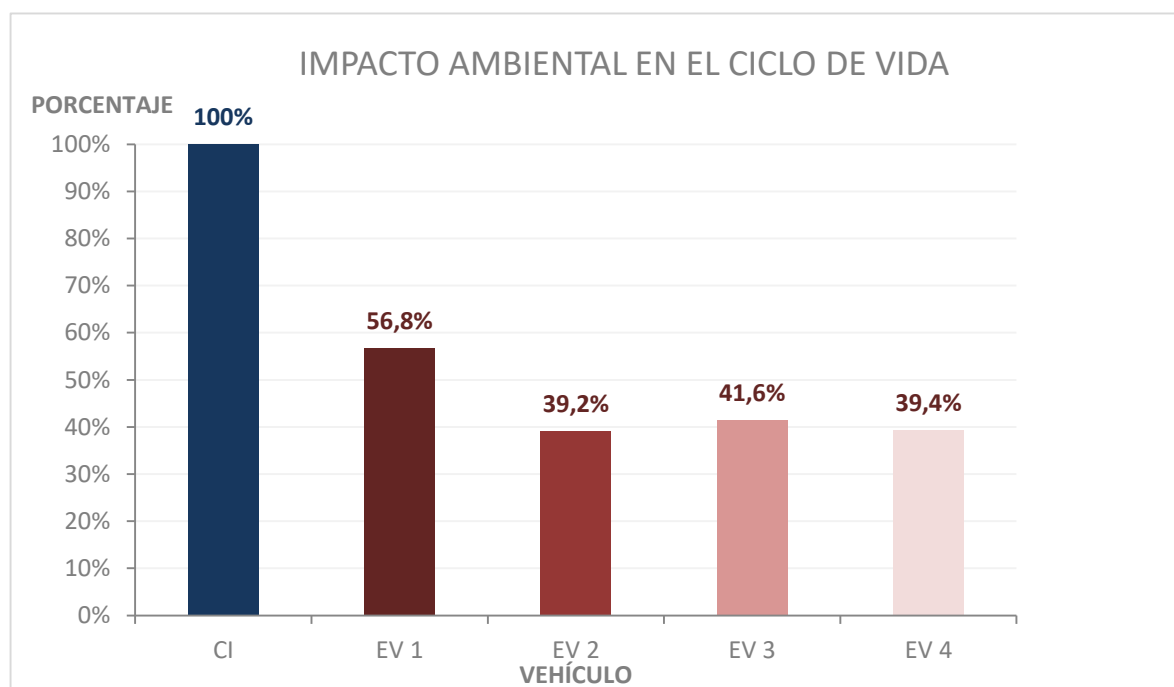


Figura 2. Impacto ambiental comparativo en el Ciclo de Vida. Elaboración propia

Por otra parte, dentro de los resultados más importantes del análisis se encontró que al implementar la técnica de reciclaje de la batería del VE, denominada *tratamiento*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

hidrometalúrgico, resulta ser más contaminante someter las baterías a este proceso de reciclaje que disponerlas directamente en un relleno sanitario. Este resultado se ve reflejado con claridad en los escenarios 2 y 4, los cuales difieren únicamente en que la batería en el primer caso es dispuesta directamente en un relleno sanitario, y en el segundo caso es reciclada a través de la técnica mencionada. En la figura número 2 es posible evidenciar que efectivamente el escenario 4, en el que se hace el proceso de reciclaje, presenta un impacto ambiental mayor que el escenario 2.

Sin embargo, a pesar de comprobar que reciclar la batería trae impactos más graves que no hacerlo, el escenario número 1 en el que no se lleva a cabo un proceso de reciclaje resulta ser el escenario más contaminante de los 4. En este caso es importante entrar a considerar que dentro del escenario número 1 se supone una vida útil corta (10 años) en comparación con los demás escenarios en los que se considera una vida útil de 16 y 20 años; lo anterior implica que los impactos correspondientes al escenario 1 se vean incrementados por tener un tiempo de vida útil considerablemente menor.

Finalmente, es importante resaltar que a pesar de que el escenario 3 tiene 20 años de vida útil y por lo tanto se esperaría que tuviera menos impactos ambientales, estos por el contrario se incrementan debido a que este escenario considera dos baterías a lo largo de la vida útil del vehículo, que traen consigo grandes impactos tanto en la etapa de materias primas y producción, como en la etapa de disposición final.

PUNTOS DE IMPACTO AMBIENTAL EN EL CICLO DE VIDA

A continuación, en la figura 3 se presentan los resultados obtenidos para el ciclo de vida de los vehículos analizados, en *puntos de impacto ambiental*. Dentro de estos resultados se exponen 17 de los 18 impactos analizados en la metodología Recipe.

Es importante aclarar que en la metodología Recipe Endpoint no existe un factor de ponderación para el impacto *agotamiento del agua* y por lo tanto no se tiene en cuenta para este análisis comparativo, sin embargo, posteriormente se hace un análisis del consumo de agua según los resultados obtenidos en la etapa *Midpoint* de la metodología empleada.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de *puntos de impacto* a lo largo del ciclo de vida de ambos vehículos, se evidencia que existen 7 categorías de impacto representativas en este proceso, las cuales se destacan significativamente por encima de los demás impactos ambientales analizados; alcanzando en promedio un 99,2% de influencia sobre el impacto ambiental total. Estos impactos corresponden a: agotamiento de recursos fósiles, cambio climático – salud humana, cambio climático – ecosistemas, formación de material particulado, agotamiento de metales, toxicidad humana y transformación natural de la tierra.

Teniendo en cuenta el porcentaje de influencia de las categorías mencionadas sobre el impacto ambiental total, este análisis se enfocará a continuación en estos 7 impactos ambientales, evaluándolos en cada una de las etapas analizadas del ciclo de vida de los vehículos.

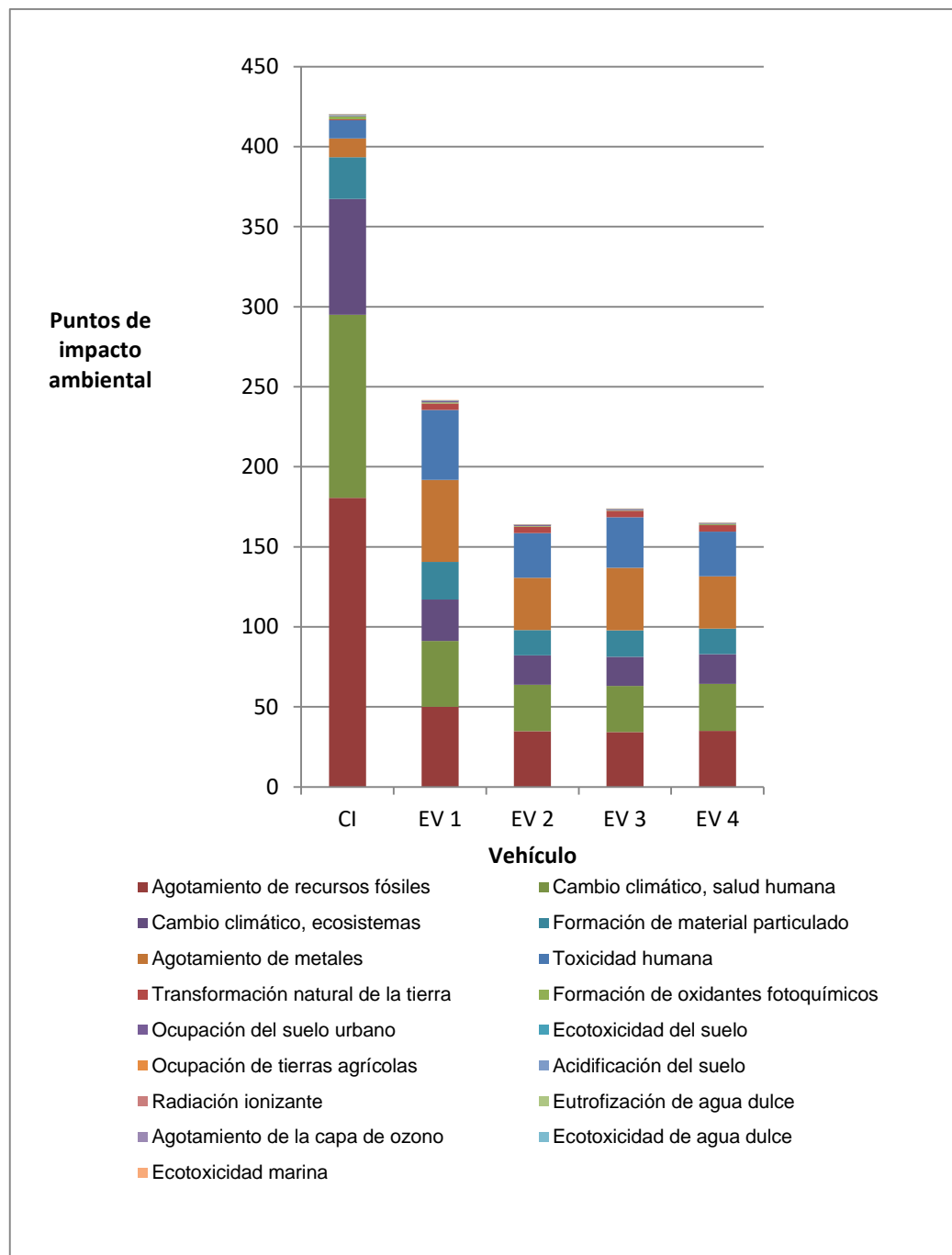


Figura 3. Puntos de impacto ambiental para el Análisis de Ciclo de Vida. Elaboración propia

3.1.2 Resultados de la etapa de Extracción de materias primas y producción

Los impactos ambientales producidos en la etapa de Materias primas y Producción varían significativamente al comparar el VCI con el VE. En esta etapa el VCI aporta únicamente el 15,6% de los impactos ambientales de su ciclo de vida, mientras que el VE aporta en promedio el 80% teniendo en cuenta los cuatro escenarios analizados.

De acuerdo con lo anterior, la etapa más impactante para el ambiente en el ciclo de vida del vehículo eléctrico es la etapa de Materias primas y Producción, lo cual se debe principalmente a la extracción de metales pesados y a la fabricación de los componentes propios del VE, es decir a la batería eléctrica de Ion-Litio y al tren motor, los cuales aportan el 53,2% de los impactos a la etapa de materias primas y producción.

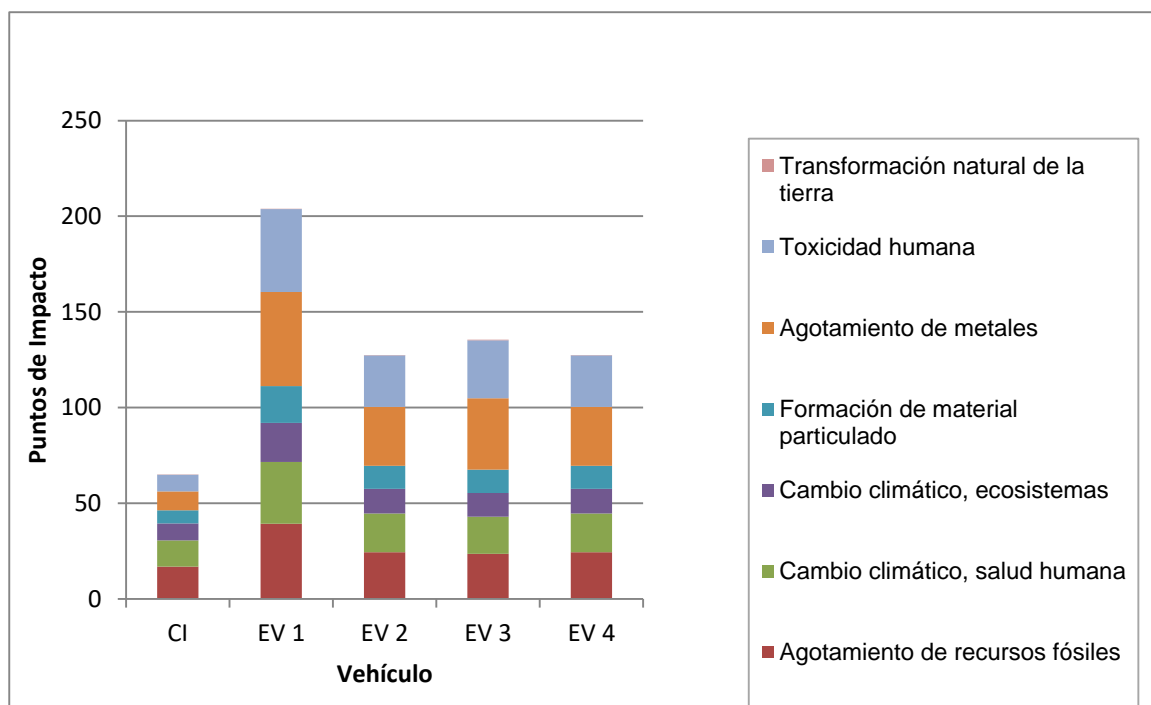


Figura 4. Puntos de impacto ambiental. Etapa extracción de materias primas y producción. Elaboración propia.

En el gráfico se observa que los impactos más altos relacionados con el VE son: cambio climático, agotamiento de recursos fósiles, agotamiento de metales y toxicidad humana; los cuales se encuentran asociados en gran medida a la producción, como se mencionó anteriormente, de la batería eléctrica y del tren motor; como consecuencia del consumo energético, la extracción y uso de metales pesados, y la emisión de sustancias tóxicas al ambiente.

Finalmente es importante aclarar que para los escenarios 2 y 4 se obtuvieron exactamente los mismos resultados, ya que el único resultado que varía entre ellos se evidencia en la etapa de disposición final con el manejo que se le da a la batería eléctrica.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.1.3 Resultados de la etapa de Transporte

Como se mencionó anteriormente, en esta etapa se evalúan los impactos ambientales producidos por el transporte de ambos vehículos desde Corea del Sur hasta la ciudad de Medellín. Según los resultados obtenidos el transporte del VCI aporta el 0,5% de los impactos ambientales de su ciclo de vida, mientras que el transporte del VE aporta en promedio el 1,5% de los impactos ambientales. Según estos porcentajes es posible afirmar que esta etapa es una de las menos impactantes dentro del análisis de ambos vehículos.

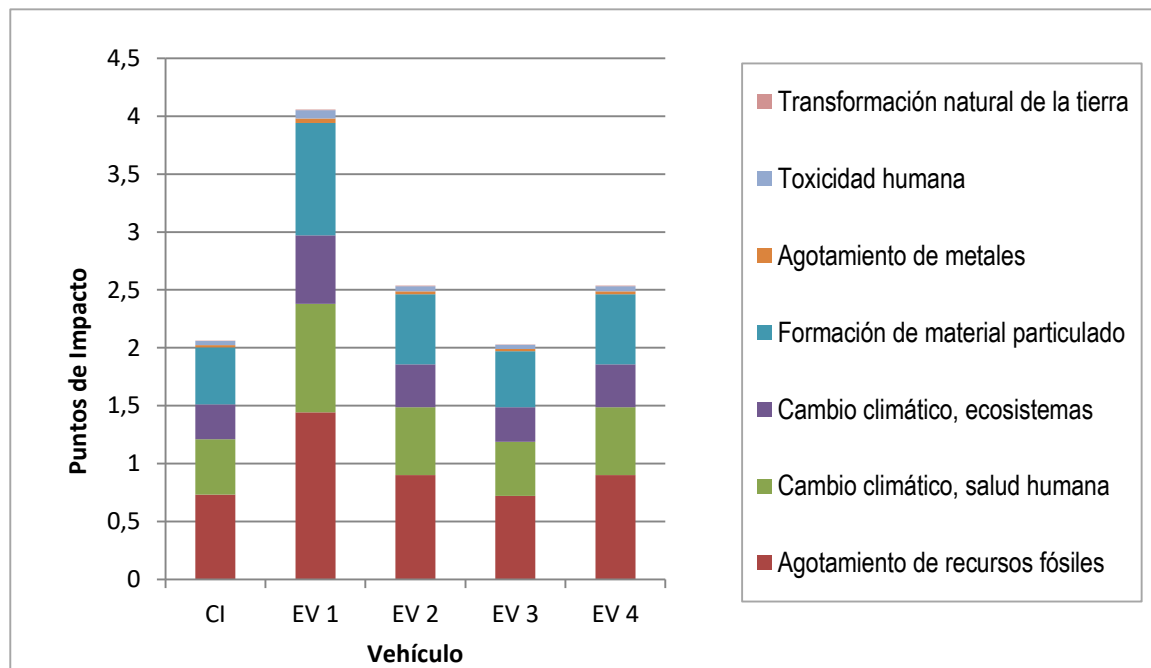


Figura 5. Puntos de impacto ambiental. Etapa de transporte. Elaboración propia.

Los impactos ambientales producidos por el transporte dependen directamente del peso del vehículo, ya que cuanto mayor sea la cantidad de toneladas transportadas, mayor será el impacto ambiental asociado. Adicionalmente, también influye la vida útil, ya que cuanto menor sea la vida útil del vehículo, mayor será el impacto ambiental por su transporte. Es por esta razón que el VE presenta el impacto mayor asociado al escenario 1, ya que este escenario representa la vida útil más corta y tiene el peso de mayor valor por estar asociado a la unidad funcional, es decir un año.

Por otro lado, se observa que los mayores impactos de esta etapa son: agotamiento de los recursos fósiles, cambio climático y formación de material particulado. Estos resultados responden precisamente al consumo de combustibles fósiles, y a las emisiones asociadas al funcionamiento tanto del buque transoceánico como del camión de carga.

Finalmente, al igual que en la etapa de materias primas, es importante aclarar que para los escenarios 2 y 4 se obtuvieron exactamente los mismos resultados, ya que el único

resultado que varía entre ellos se evidencia en la etapa de disposición final con el manejo que se le da a la batería eléctrica.

3.1.4 Resultados de la etapa de Uso

Los impactos ambientales producidos en la etapa de uso varían significativamente al comparar el VCI con el VE. En esta etapa el VE aporta en promedio el 15,6 % de los impactos ambientales de su ciclo de vida, mientras que el VCI aporta el 82,6%.

De acuerdo con lo anterior, la etapa más impactante para el ambiente en el ciclo de vida del vehículo de combustión interna es la etapa de uso, lo cual se debe principalmente a la extracción de recursos fósiles para los combustibles, y a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero durante el uso. Los impactos ambientales generados por estos procesos se ven reflejados en la gráfica, ya que traen consigo altas repercusiones en el agotamiento de recursos fósiles y en el cambio climático.

El vehículo eléctrico por su parte presenta un impacto ambiental muy bajo durante la etapa de uso, esto se debe a que en el contexto colombiano la energía consumida para su funcionamiento es generada en un 85,7% por hidroeléctricas. No obstante, es importante resaltar que a pesar de ser un impacto bajo no es posible afirmar que durante el uso las emisiones del vehículo eléctrico son equivalentes a cero, ya que la generación de energía trae consigo emisiones asociadas al proceso.

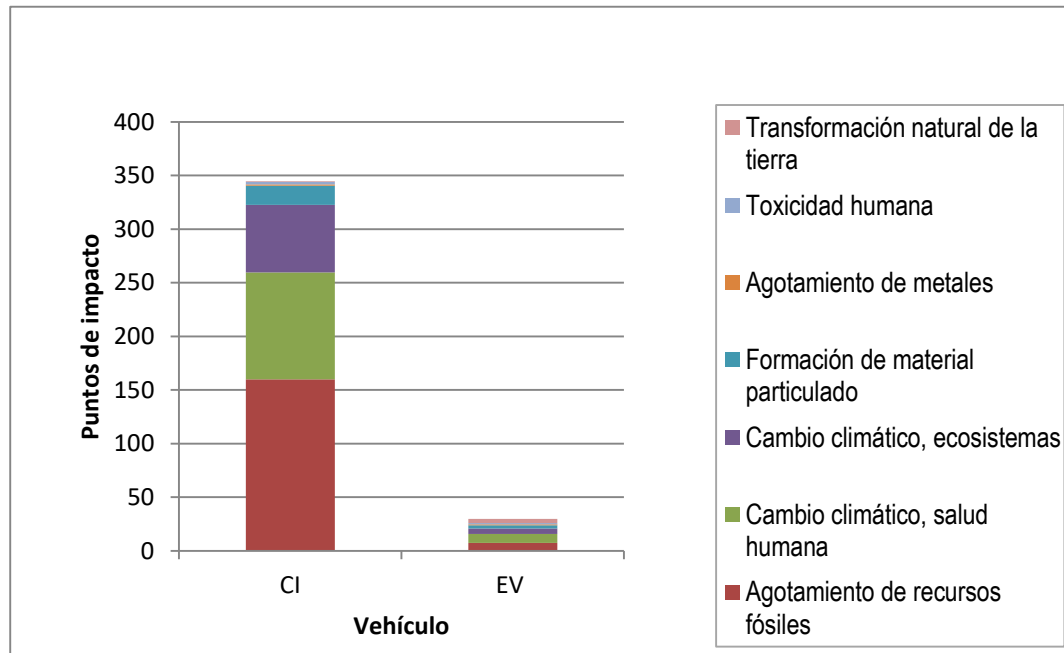


Figura 6. Puntos de impacto ambiental. Etapa de uso. Elaboración propia.

3.1.5 Resultados de la etapa de Mantenimiento

Según los resultados obtenidos la etapa de mantenimiento representa un porcentaje muy bajo de los impactos ambientales del ciclo de vida de los vehículos analizados, este porcentaje equivale al 1,7% para el vehículo de combustión interna y al 2,6% en promedio para el vehículo eléctrico.

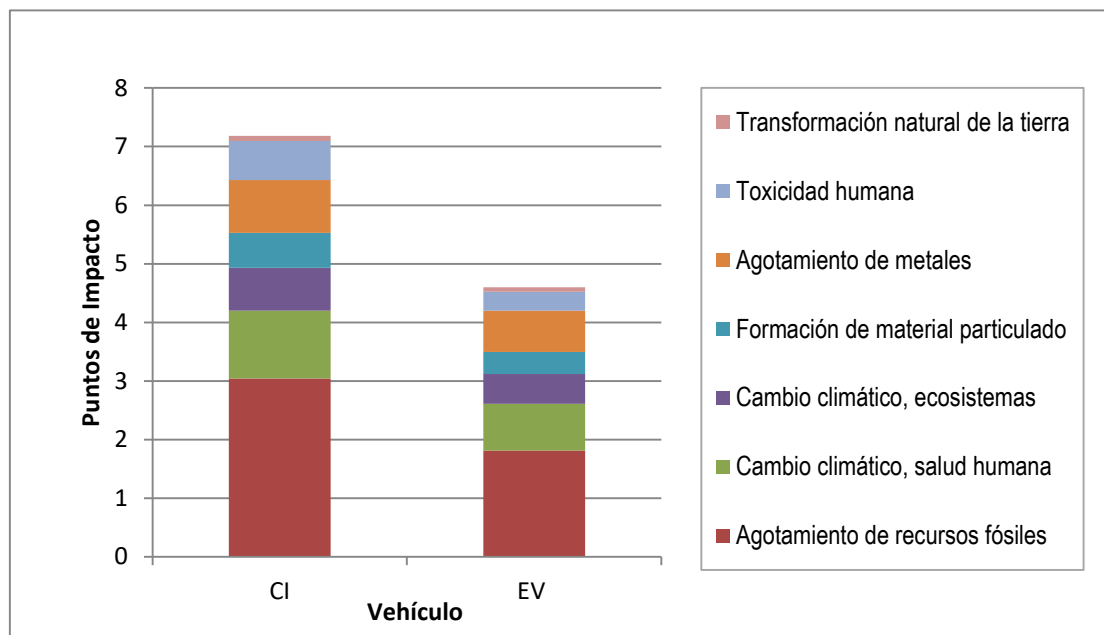


Figura 7. Puntos de impacto ambiental. Etapa de mantenimiento. Elaboración propia.

En la gráfica se puede observar que el impacto ambiental producido por el mantenimiento del VCI es mayor que el impacto ocasionado por el VE, esto se debe a que el motor de combustión interna requiere un proceso de mantenimiento más intensivo que el requerido por el sistema de funcionamiento del VE.

Adicionalmente se obtiene que el agotamiento de recursos fósiles es el impacto más significativo para ambos vehículos, este impacto se encuentra asociado a la producción del líquido refrigerante, así como de las llantas y los neumáticos requeridos para el mantenimiento de ambos vehículos, y la producción del aceite lubricante requerido únicamente para el vehículo de combustión interna.

3.1.6 Resultados de la etapa de Disposición final

Los resultados obtenidos en la etapa de disposición final se encuentran ligados directamente a los procesos de reciclaje considerados en el análisis, es decir el reciclaje de la carrocería de ambos vehículos, del motor en el caso del VCI, y del tren motor y de la batería eléctrica en el caso del VE. Teniendo en cuenta estos procesos de reciclaje, en la gráfica se observa que algunos de los impactos son negativos, lo cual significa que el proceso de reciclaje ha compensado parte de los impactos ambientales generados por la etapa de disposición final al apreciarla de forma general.

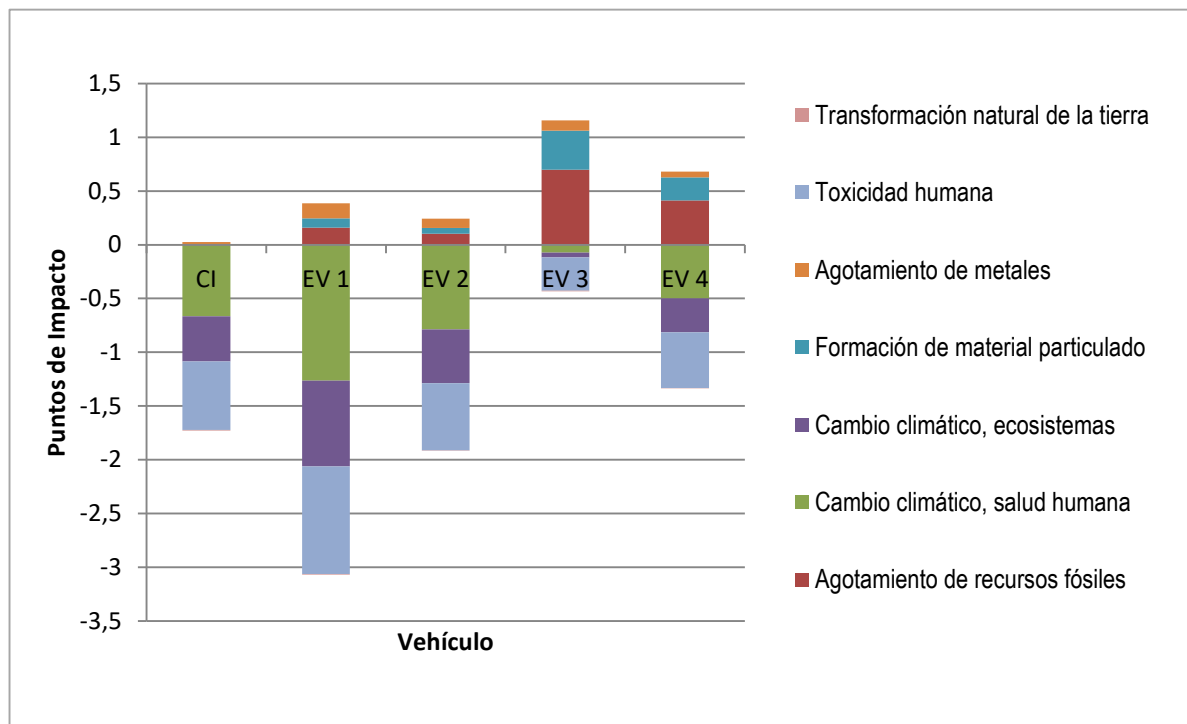


Figura 8. Puntos de impacto ambiental. Etapa de disposición final. Elaboración propia

En la figura 8 se observa que después de llevar a cabo el proceso de reciclaje de las partes mencionadas para ambos vehículos, algunos de los resultados arrojados por el software son negativos, estos valores se obtienen como resultado de la resta de los impactos ocasionados en la etapa de disposición final y los impactos mitigados como resultado del reciclaje de algunos de los componentes de ambos vehículos.

Por otra parte, de acuerdo a los puntos de impacto obtenidos en los resultados se observa que la etapa de disposición final de ambos vehículos tiene poca incidencia dentro del ciclo de vida. Sin embargo, es importante destacar que la disposición final del vehículo eléctrico tiene un impacto mayor en comparación con el vehículo de combustión interna, especialmente en los escenarios 3 y 4.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el proceso de disposición final de la batería, teniendo en cuenta su relevancia dentro del proceso general de disposición final del vehículo eléctrico.

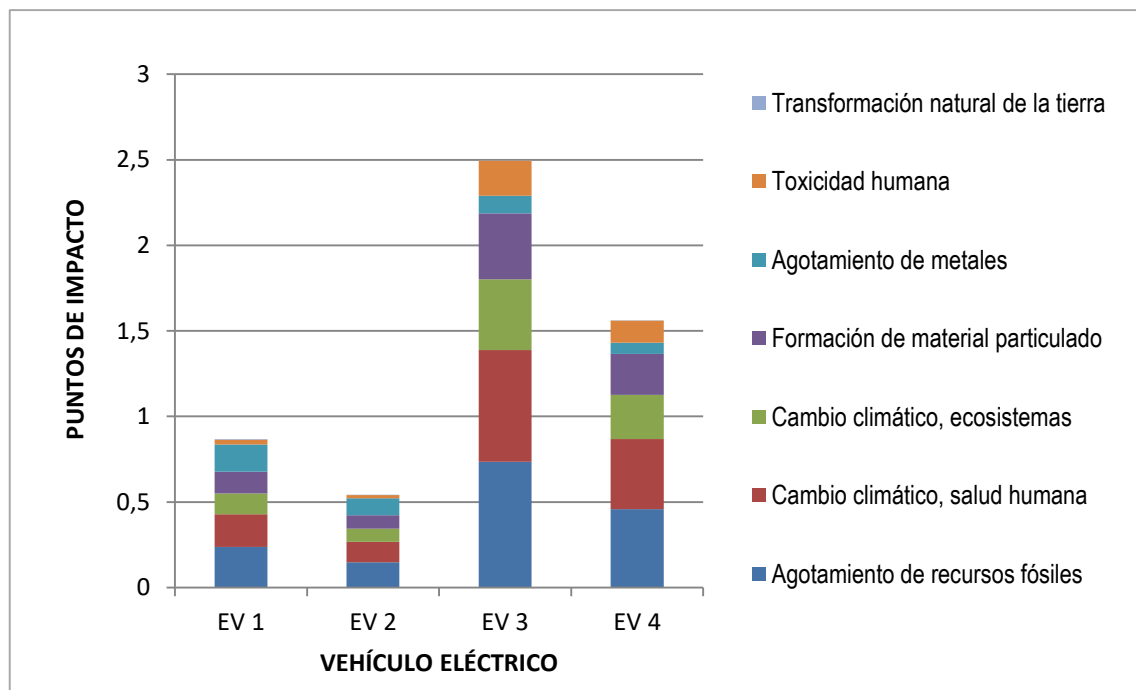


Figura 9. Puntos de impacto ambiental. Etapa de disposición final de la batería eléctrica. Elaboración propia.

Dentro de los resultados más importantes del análisis de ciclo de vida se encontró que al implementar la técnica de reciclaje de la batería del VE, denominada *tratamiento hidrometalúrgico*, resulta ser más contaminante someter las baterías a este proceso que disponerlas directamente en un relleno sanitario. En la figura 9 se puede observar que al analizar únicamente la disposición final de la batería eléctrica el análisis arroja que los escenarios donde se recicla la batería, es decir los escenarios 3 y 4, son más contaminantes que los escenarios 1 y 2 en los que las baterías son dispuestas directamente en un relleno sanitario.

Este resultado se debe en primer lugar a que este proceso no se realiza actualmente en Colombia y por lo tanto se consideran los impactos de la generación energética promedio de los países a nivel mundial donde actualmente se desarrolla el proceso. Esta consideración trae implicaciones en términos de cambio climático, agotamiento de recursos fósiles y formación de material particulado; ya que en muchos de estos países la energía empleada no proviene de fuentes de generación limpia, con el agravante de que para el proceso de reciclaje se requiere de un consumo energético alto.

En segundo lugar, el tratamiento hidrometalúrgico de las baterías eléctricas tiene un fuerte impacto por contaminación ambiental, debido a que durante el proceso se generan vertimientos con alta carga orgánica, además de sustancias como: cobalto, cobre, dióxido de sulfuro, fluoruro y níquel.

Por último, se observa que el reciclaje de la batería trae consigo un impacto mayor en términos de toxicidad humana, esto se debe a la exposición de quienes realizan el tratamiento, a sustancias tóxicas como litio, nitrógeno líquido y otras sustancias residuales.

Resultados metodología Recipe Midpoint (H)

A continuación, se presentan los resultados correspondientes al análisis Midpoint (H) de los 7 impactos más representativos, durante todo el ciclo de vida de los vehículos.

3.1.7 Agotamiento de recursos fósiles

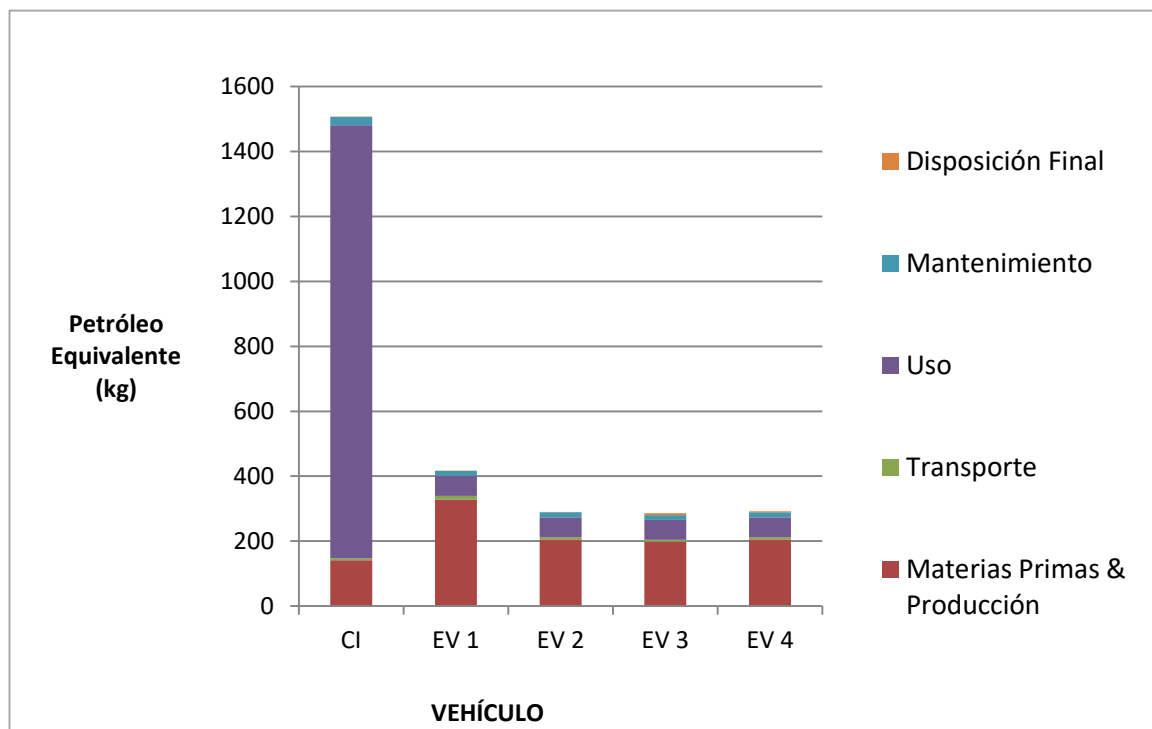


Figura 10. Valores de impacto. Categoría Agotamiento de recursos fósiles. Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 10, el mayor impacto en el agotamiento de los recursos fósiles, considerando ambos vehículos, es generado por el VCI, debido principalmente a los impactos ocasionados en la etapa de uso (88,5%) y en la etapa de extracción de materias primas y producción (9,4%).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En la etapa de uso, el alto impacto se da como consecuencia del consumo de gasolina requerida para el funcionamiento del vehículo, mientras que en la etapa de materias primas el impacto se encuentra relacionado con las fuentes de generación energética disponibles en Corea del Sur, en donde son fabricados los vehículos. Lo anterior se debe a que en Corea del Sur el 83,3% de la energía proviene de combustibles fósiles como petróleo (40,1%), carbón (27,8%), y gas natural licuado (15,4%) (Korea Energy Economics Institute, 2017).

Asimismo, para el VE se obtiene que la etapa de materias primas y producción aporta al impacto de agotamiento de recursos fósiles el 78,7% en el escenario 1 y en promedio el 48,5% para los demás escenarios. Al igual que para el vehículo de combustión, esto se debe a la generación de energía eléctrica que se da en Corea del Sur.

3.1.8 Cambio climático

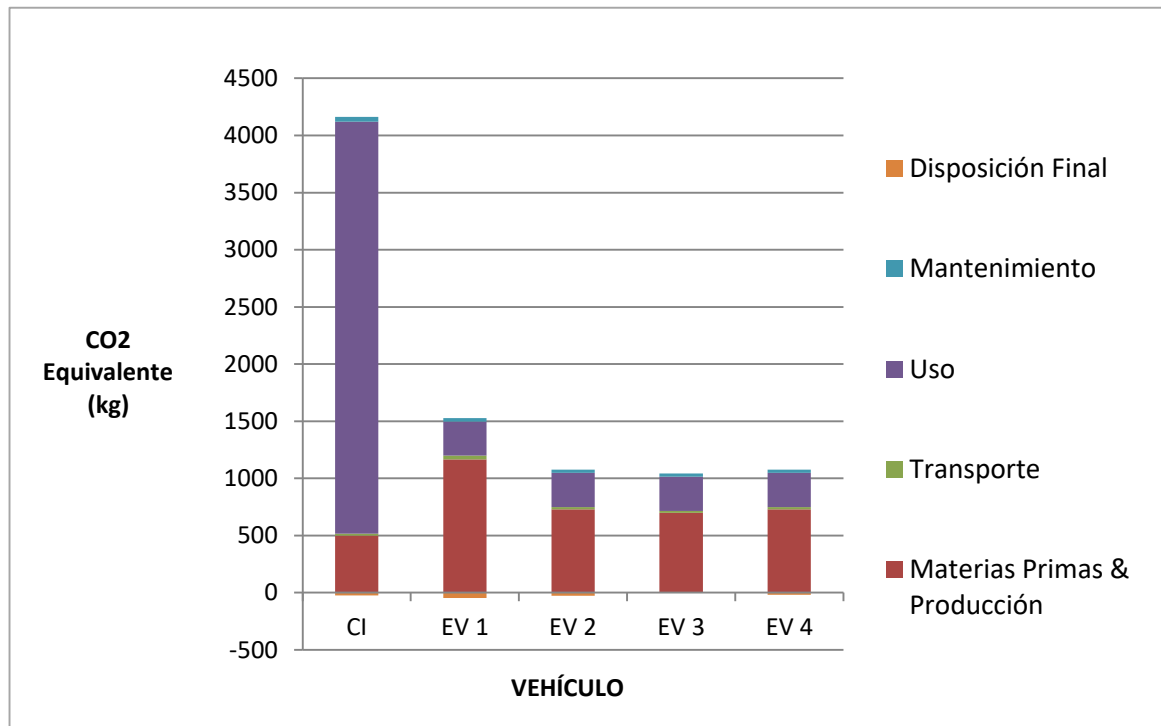


Figura 11. Valores de impacto. Categoría Cambio climático. Elaboración propia

El impacto de cambio climático guarda una estrecha relación con la incorporación de recursos fósiles en los procesos, ya que su uso se encuentra asociado directamente con las emisiones de gases de efecto invernadero. Por esta razón el impacto de cambio climático arroja unos resultados muy similares al impacto de agotamiento de recursos fósiles.

Se observa que la mayor contribución al cambio climático le corresponde al VCI en su etapa de uso, precisamente por la implementación de la gasolina como combustible. De igual forma para el VE se obtiene que la etapa de materias primas contribuye en gran medida al impacto de cambio climático con una incidencia promedio del 70 % sobre el ciclo de vida, lo cual se encuentra asociado al uso de energía en Corea del Sur, proveniente de recursos fósiles en el proceso de producción del vehículo.

Adicionalmente, para el vehículo eléctrico se obtiene que la etapa de uso genera en promedio un impacto de cambio climático del 26 % dentro del ciclo de vida de este vehículo, este resultado responde a las emisiones asociadas a la generación de energía que posteriormente es consumida por el vehículo. Es importante tener en cuenta que la generación energética hidroeléctrica tiene asociadas emisiones de CO₂ como producto de la degradación de la materia orgánica en las zonas de embalse. Adicionalmente el porcentaje de impacto también se encuentra asociado a la generación energética colombiana que hace uso de termoeléctricas.

3.1.9 Formación anual de material particulado

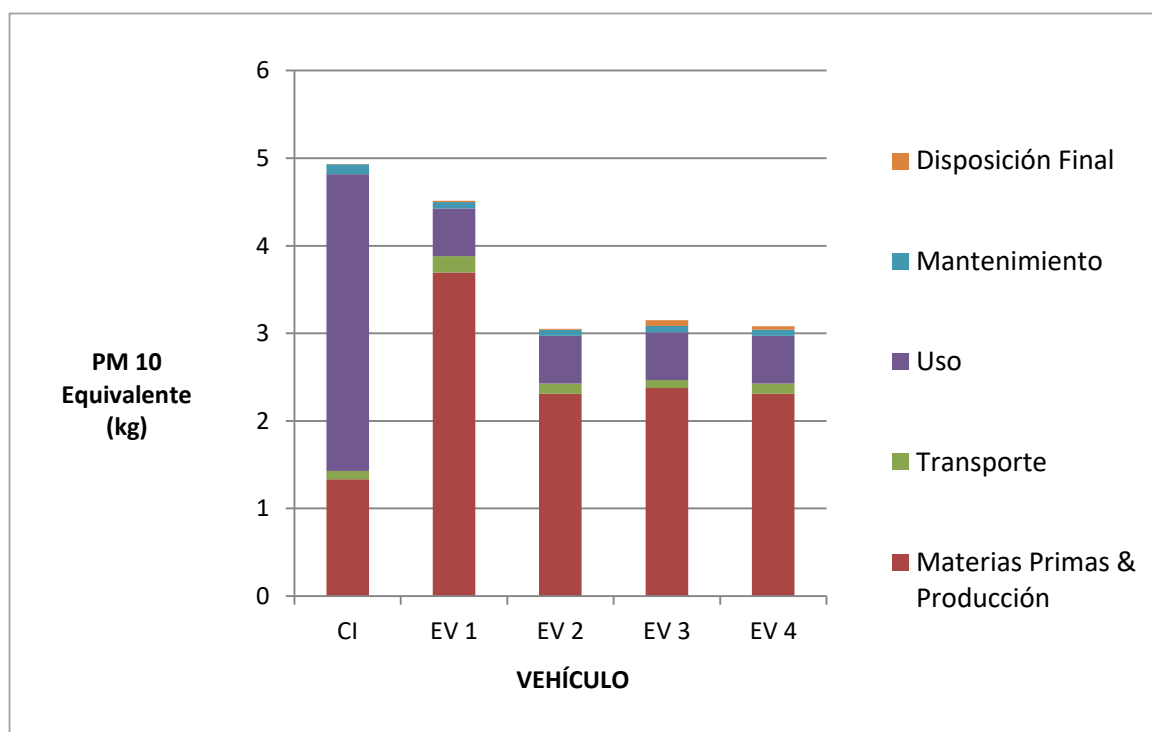


Figura 12. Valores de impacto. Categoría Formación de material particulado. Elaboración propia

Al igual que los impactos anteriores, en la figura 12 se evidencia que el vehículo de combustión interna presenta un impacto de formación de material particulado (PM) más alto que el vehículo eléctrico, siendo la etapa de uso la de mayor influencia, con un porcentaje de impacto del 68,7%. Este resultado se debe a las emisiones generadas como consecuencia del uso de la gasolina.

Sin embargo, a diferencia de los impactos ambientales anteriores, en este caso el vehículo eléctrico presenta en el primer escenario un impacto muy similar al ocasionado por el VCI, con la diferencia de que la etapa de materias primas y producción es la responsable de la mayor contribución a la formación de material particulado. Esta generación de PM se debe al igual que en los impactos anteriores a que la fabricación se da en Corea del Sur, en donde el 67,9% de la energía proviene del uso de petróleo (40,1%) y del uso de carbón (27,8%), los cuales generan material particulado como consecuencia de su quema (Korea Energy Economics Institute, 2017).

Finalmente, es importante destacar que el impacto de la etapa de extracción de materias primas y producción es superior en todos los escenarios del vehículo eléctrico, en comparación con el vehículo de combustión interna, esto se debe a que la fabricación del VE requiere un consumo energético, por lo que se incrementa la formación de PM teniendo en cuenta, como se mencionó anteriormente, que la generación en Corea del Sur depende en gran medida del uso de combustibles fósiles.

3.1.10 Agotamiento anual de metales

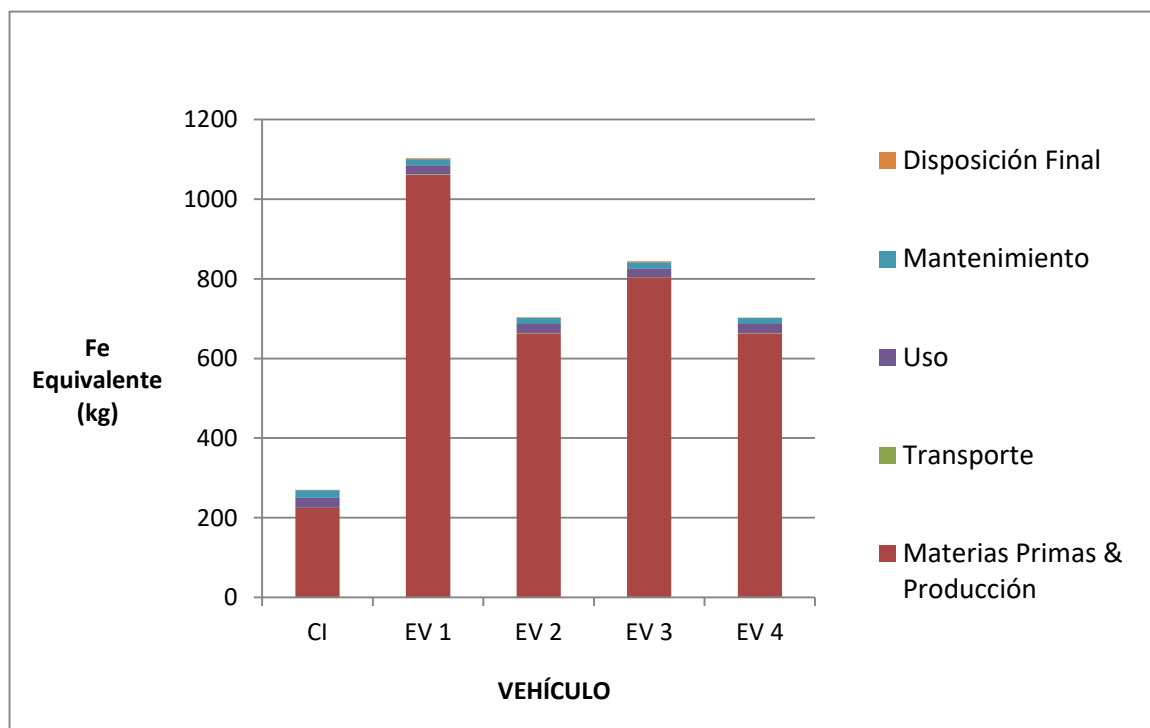


Figura 13. Valores de impacto. Categoría Agotamiento de metales. Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Al analizar los resultados arrojados para el impacto de agotamiento de metales se hace evidente que el vehículo eléctrico es el principal causante de este impacto, siendo la etapa de materias primas y producción la más influyente. Según los resultados obtenidos, la fabricación de la batería eléctrica y del tren motor del EV contribuyen en un 67,8% al impacto de agotamiento de metales que genera el vehículo. El VCI de por su parte genera en comparación con el EV un impacto mucho menor en el que de igual forma la etapa de materias primas y producción resulta ser la de mayor influencia.

3.1.11 Toxicidad humana anual

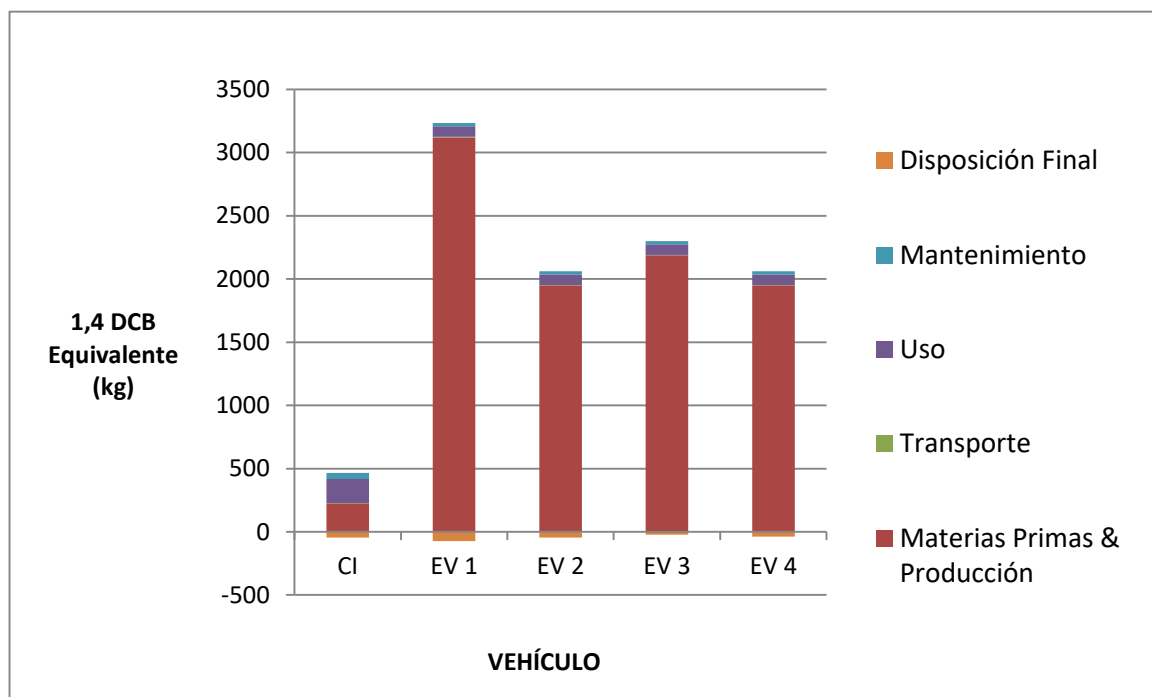


Figura 14. Valores de impacto. Categoría Toxicidad humana. Elaboración propia

El impacto de toxicidad humana se encuentra directamente relacionado con el uso de sustancias tóxicas en la fabricación de los vehículos, o con la emisión de contaminantes o material particulado que puedan ser perjudiciales para la salud. En la figura 14 se puede evidenciar que la etapa de extracción de materias primas y producción del vehículo eléctrico resulta ser la más perjudicial en términos de toxicidad humana con un aporte promedio del 69%, este resultado se debe a que precisamente en esta etapa se hace uso de metales y otras sustancias que resultan ser tóxicas para el hombre, adicionalmente en esta etapa como se observa en la gráfica se evidencia material particulado que de igual forma resulta ser nocivo para la salud.

El vehículo de combustión interna por su parte genera un impacto mucho menor en comparación con el VE, y su impacto más significativo se da en las etapas de extracción de materias primas y producción en la que el hombre tiene contacto con sustancias tóxicas

principalmente en la fabricación del motor; y en la etapa de uso, en la cual se emite material particulado o gases que son nocivos para la salud humana.

3.1.12 Transformación natural de la tierra anual

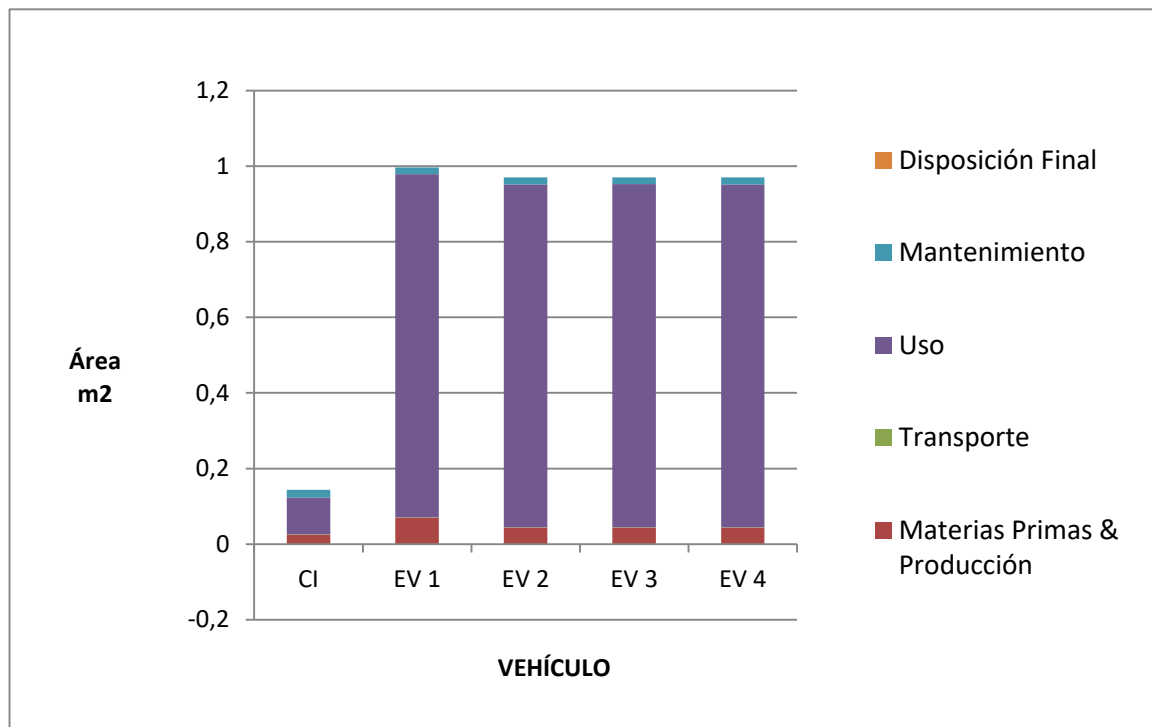


Figura 15. Valores de impacto. Categoría Transformación natural del suelo. Elaboración propia

El impacto de transformación natural de la tierra se entiende como la transformación del uso natural del suelo, para desarrollar otros usos de carácter antrópico, o como la transformación de un uso menos contaminante a un uso más contaminante. En este caso, el vehículo eléctrico resulta ser el responsable del impacto más alto en la transformación natural de la tierra, el cual se debe principalmente a la etapa de uso del vehículo. Esto se debe a la transformación del suelo para la instalación principalmente de embalses y plantas de generación hidroeléctrica.

El vehículo de combustión interna genera un impacto de transformación natural de la tierra mucho menor que el VE, que se encuentra relacionado igualmente en su mayoría con la etapa de uso del vehículo, esto se debe básicamente al área destinada al proceso de extracción de petróleo.

3.1.13 Consumo anual de agua

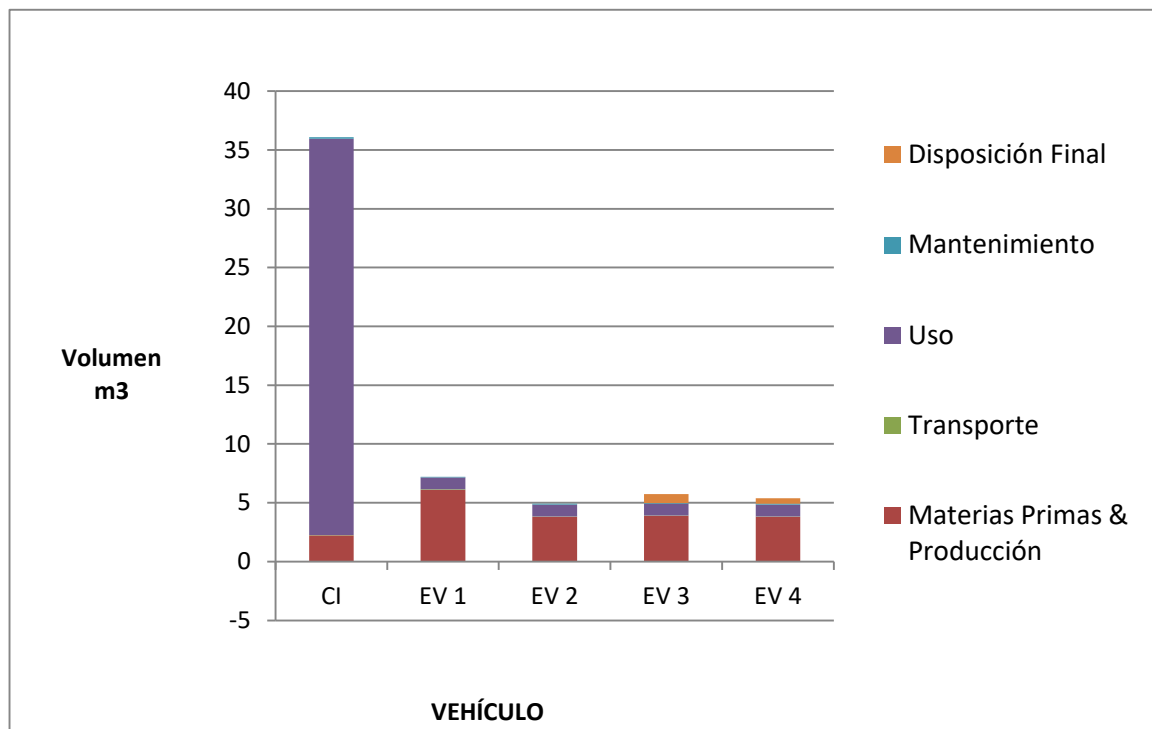


Figura 16. Consumo de agua. Elaboración propia

La gráfica correspondiente al consumo de agua anual, este resultado no representa directamente un impacto ambiental, sino que muestra el consumo de agua requerido durante el ciclo de vida de ambos vehículos. En esta gráfica se puede ver que el VCI requiere una cantidad de agua significativamente mayor en comparación con el VE. Esto se debe a que el petróleo requiere un gran volumen de agua para su proceso de refinamiento. El vehículo eléctrico por su parte requiere una cantidad notablemente menor de agua, que es empleada principalmente en la etapa de materias primas y producción.

3.1.14 Análisis de sensibilidad

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se hace una variación del 10% en los valores indicados en cada una de las limitaciones del estudio y posteriormente se corre de nuevo el software con la intención de verificar que los resultados globales no varíen más del 5% respecto a los valores originales. En caso de que esta variación sea superior al 5% para alguna de las limitaciones del estudio, significa que el dato es sensible y por lo tanto es necesario ajustarlo hasta obtener una mayor precisión.

Limitación I: la vida útil del vehículo de combustión interna es de 16 años, y es variada en un 10%, es decir, se evalúan los resultados empleando un valor de vida útil de 17,6 años. Según los resultados obtenidos, la vida útil del vehículo de combustión interna no es un dato sensible ya que al variar este valor en un 10%, solo se obtiene un porcentaje de error del 1,35%.

Limitación II: *el desplazamiento del vehículo de combustión interna se da el 70% del tiempo en zonas urbanas y el 30% del tiempo en zonas rurales.* Estos valores son modificados en un 10% para obtener nuevamente los resultados, es decir que se asume un desplazamiento en el que el 60% del tiempo se recorren zonas urbanas y el 40% del tiempo zonas rurales.

Según los resultados obtenidos, los porcentajes de uso del vehículo de combustión interna son valores sensibles, ya que el porcentaje de error respecto a los valores originales supera el 5%. Por este motivo los resultados obtenidos en este análisis de Ciclo de Vida deben tomarse como ciertos únicamente bajo las condiciones de desplazamiento dadas, es decir, que el desplazamiento del vehículo sea 70% urbano y 30% rural.

4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

- A partir del Análisis de Ciclo de Vida se concluye que, en el contexto colombiano, el vehículo de combustión interna es más contaminante que el vehículo eléctrico.
- Las categorías de impacto ambiental más relevantes durante el ciclo de vida tanto del vehículo de combustión interna, como del vehículo eléctrico corresponden a: agotamiento de metales, agotamiento de recursos fósiles, cambio climático, formación de material particulado, transformación natural del suelo y toxicidad humana.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en el Análisis de Ciclo de Vida, se concluye que la etapa más impactante del vehículo de combustión interna es el uso, con un porcentaje de influencia sobre el impacto ambiental global de un 82,6%. Mientras que para el vehículo eléctrico la etapa más contaminante es la de materias primas y producción, con un porcentaje de influencia en promedio del 80% sobre el impacto ambiental global.
- Los impactos ambientales generados por el vehículo eléctrico cuando se recicla la batería en la etapa de disposición final, son mayores que cuando ésta es dispuesta directamente en un relleno sanitario. Esto se debe a que durante el proceso de reciclaje de la batería se generan impactos ambientales residuales que contribuyen a que el ciclo de vida del vehículo sea aún más contaminante.
- Con el fin de obtener mayor claridad respecto a los impactos ambientales del vehículo eléctrico, es recomendable profundizar en la etapa de disposición final y analizar nuevamente el ciclo de vida del vehículo considerando un manejo diferente de la batería eléctrica, es decir, una segunda vida de la misma o la implementación de un proceso de reciclaje diferente al tratamiento hidrometalúrgico.
- A pesar de que el vehículo de combustión interna presenta un impacto ambiental mayor en el panorama global, se concluye que el vehículo eléctrico presenta mayores impactos ambientales en las categorías de toxicidad humana, agotamiento de metales y transformación natural de la tierra.
- A partir del Análisis de Ciclo de Vida, es posible concluir que el vehículo eléctrico presenta emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a todas las etapas de su ciclo de vida, por lo que no es posible afirmar que es un vehículo cero emisiones.
- A partir del análisis de sensibilidad, se concluye que los porcentajes de uso que describen el modo de conducción del vehículo de combustión interna son valores sensibles, ya que el porcentaje de error respecto a los valores originales supera el 5%. Por este motivo los resultados obtenidos en este análisis de Ciclo de Vida deben tomarse como ciertos únicamente bajo las condiciones de desplazamiento dadas, es decir, que el desplazamiento del vehículo sea 70% urbano y 30% rural. En caso de considerar una modificación de estos porcentajes, se debe tener presente la variación en los resultados.

- En Colombia la energía nacional depende en un 85,8% de la generación hidroeléctrica, este contexto favorece al vehículo eléctrico en su etapa de uso. Sin embargo, en otros países en los que la generación de energía depende de termoeléctricas a base de recursos como el carbón, se podrían obtener resultados de impacto completamente diferentes. Es importante evaluar los impactos ambientales de los vehículos eléctricos según el contexto de cada país, ya que, dependiendo de las condiciones de generación de energía, su uso podría ser más o menos impactante que los vehículos de combustión interna.

REFERENCIAS

- Aguirre, K., Eisenhardt, L., Lim, C., Nelson, B., Norring, A., Slowik, P., & Tu, N. (2012). Life cycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle. *PhD Thesis*, (June), 1–33.
- Andrade, H. J., Arteaga, C. C., & Segura, M. A. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia), 18(1), 103–112.
- AUTO SCOUT 24. (2018). *El motor del automóvil*. Obtenido de <https://www.autoscout24.es/informacion/asesor/tecnologia-del-automovil/motor-coche/>
- Bueno, D. (2014). *MOTOR ELECTRICO - TIPOS Y FUNDAMENTOS*. Obtenido de <https://1mecanizadoelarenal.files.wordpress.com/2014/11/motor-electrico.pdf>
- DANE. (2017). *Encuesta anual manufacturera (EAM)*. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam>
- ECOINVENT VERSIÓN 3.4. (2017). *Base de datos*.
- Egede, P., Dettmer, T., Herrmann, C., & Kara, S. (2015). Life cycle assessment of electric vehicles - A framework to consider influencing factors. *Procedia CIRP*, 29, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.185>
- FONDO FORMACIÓN. (2001). *Motores Síncronos*. Obtenido de http://myelectronic.mipropia.com/CICLO_2/M08_01_MOTORES_SINCRONOS.PDF?i=2
- FUEL ECONOMY. (2019). *Hybrids, Diesels, and Alternative Fuel Cars*. Obtenido de <https://www.fueleconomy.gov/feg/alternatives.shtml>
- Hall, D., & Lutsey, N. (2018). Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions. Retrieved from https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53–64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD. (2016). *Inventario Nacional Y Departamental De Gases Efecto Invernadero - Colombia*. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>

Instituto Superior del Medio Ambiente. (s.f.). *ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA: CONCEPTOS Y METODOLOGÍA*. Obtenido de: <http://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/análisis-del-ciclo-de-vida-conceptos-y-metodologia>.

International Energy Agency. (2009). Technology roadmaps – Electric and plug-in hybrid electric vehicles. Retrieved from: http://www.ieahev.org/assets/1/7/EV_PHEV_Roadmap.pdf

IPCC. (2006). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual.

KIA. (2019). *ESPECIFICACIONES*. Obtenido de <https://www.kia.com/co/showroom/soul-ev/specification.html>

KIA. (2019). *KIA, La Empresa*. Obtenido de KIA Motors Corporation: <https://www.kia.com/es/todo-sobre-kia/empresa/#>

Korea Energy Economics Institute. (2017). *Energy Info. Korea*.

LA REPÚBLICA. (2015). “*Fábrica de Kia en México nos permitirá traer carros más baratos a Colombia*”. Obtenido de <https://www.larepublica.co/empresas/fabrica-de-kia-en-mexico-nos-permitira-traer-carros-mas-baratos-a-colombia-2229986>

Leiva, E. H. (2016). Análisis de Ciclo de Vida, 43. Tomado de: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2207.3689>

Martínez Villegas, A. (2007). *MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA*.

Mateo, O. M. (2010). Reducción de las emisiones de CO₂ en vehículos de transporte: combustibles alternativos.

Murillo García, J. (2016). *Análisis de viabilidad de una planta de reciclado de baterías de Li-ion*. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90759/fichero/An%C3%A1lisis+de+viabilidad+de+una+planta+de+reciclado+de+bater%C3%ADas+de+Li-ion.+Juan+Murillo+Garc%C3%ADa.pdf>

OpenLCA. (2019). Obtenido de <http://www.openlca.org/>

Quantifying Sustainability. (2019). *ReCiPe*. Obtenido de <https://www.pre-sustainability.com/recipe>

Romero, M. (2008). Análisis De Ciclo De Vida (ACV) Herramienta De Gestión Ambiental. *Análisis De Ciclo De Vida*, 16. Tomado de: <https://static.eoi.es/savia/documents/componente45558.pdf>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

SEA RATES. (2019). Obtenido de <https://www.searates.com/es/>

TRADE MAP. (2019). *List of importing markets for a product exported by Colombia.* Obtenido de Motor cars and other motor vehicles principally designed for the transport of persons: https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_TS.aspx?nvpm=1%7c170%7c%7c%7c%7c8703%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c2%7c2%7c1%7c2%7c1%7c1

TRADE MAP. (2019). *List of supplying markets for a product imported by Colombia.* Obtenido de Motor cars and other motor vehicles principally designed for the transport of persons: https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_TS.aspx?nvpm=1%7c170%7c%7c%7c%7c8703%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c2%7c1%7c1

Transport & Environment. (2017). Electric vehicle life cycle analysis and raw material availability. Retrieved from <https://www.transportenvironment.org/publications/electric-vehicle-life-cycle-analysis-and-raw-material-availability>

UNIVERSIDAD DE VALENCIA. (2008). *MOTOR DE CORRIENTE ALTERNA (AC) SÍNCRONO.* Obtenido de <https://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/motores-Sincronos-0809.pdf>

UPB. (2016). Modelo de Emisiones IVE. ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. Obtenido de: https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Inventario-de-emisiones/Inventario_FuentesM%C3%B3viles2016.pdf

UPME. (2019). Calculadora de Huella de Carbono. Obtenido de: http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

Weidema , B., Reinhard, J., Bauer, C., Hischier, R., Mutel , C., Nemecek , T., . . . Wernet, G. (2013). *Ecoinvent.* Obtenido de Overview and methodology: https://www.ecoinvent.org/files/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf

WORLD BUSINESS COUNCIL. (2004). *Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability.*

XM. (2017). *INFORMES ANUALES.* Obtenido de <http://informesanuales.xm.com.co/SitePages/Default.aspx>